



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Análisis de las interacciones suelo-vegetación-atmósfera en un talud experimental

Treball realitzat per:

Vinicio Fabián Guachizaca Contenido

Dirigit per:

Antoni Lloret

Marcel Hürlimann

Màster en:

Enginyeria del terreny

Barcelona, 09 de mayo de 2018

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Resumen

SMuCPhy es un proyecto enfocado a la investigación de las “Acciones sobre el Cambio Climático y eficiencia en el uso de recursos y materias primas” a tres escalas distintas (ladera, cuenca de primer orden y región) desarrollado por docentes y/o investigadores de la UPC. El presente trabajo de fin de master (TFM) se desarrolla a partir de los datos obtenidos de un experimento a escala real (escala de ladera) en un terraplén experimental diseñado por (Oorthuis 2016) en el sector Agrópolis con materiales característicos del delta de Llobregat. La construcción, supervisión e instrumentación del área no vegetada se presenta en (Cevallos 2017). En estos dos trabajos se realiza la caracterización del material y el análisis correspondiente al primer mes de monitoreo validando los datos que registran los sensores instalados.

Previo a la modelación se realizan ensayos edométricos y triaxiales para definir las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo. El diseño y colocación del sistema de drenaje que recoge el agua que circula por la superficie de los taludes (flujo superficial). Implementación de herramientas informáticas de software libre (placa de Arduino) utilizando un sensor de ultrasonido instalado al final del drenaje para medir la altura de agua en un vertedero de sección conocida. Ampliación de la instrumentación en el terraplén en el área con vegetación incluyendo nuevos sensores para medir variables atmosféricas y del estado del suelo y propuesta de instalar tubería de PVC para cuantificar el caudal infiltrado producto de las precipitaciones en el contorno del terraplen.

Con los datos obtenidos del monitoreo en el área no vegetada durante el primer año se realiza el acoplamiento de los procesos Termo-Hidráulicos empleando un modelo de elementos finitos en el programa Code_Bright. De la modelación se realiza un análisis de la interacción suelo-atmosfera con las variables medidas y calculadas correspondiente a: temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua y presión de líquido. Generalmente los valores calculados son comparables con lo que se ha medido in situ que permitirá aplicar registros predictivos basados en el cambio climático para ver su efecto en las geoestructuras. La temperatura y los contenidos volumétricos de agua (VWC) están bien pronosticados exceptuando el primer período de secado. Esto tal vez es debido a los efectos de deformación e histéresis que se estudiarán más a fondo en el proyecto junto con al efecto de la vegetación.

Abstract

Research project SMuCPHy is focus in “Actions on Climate Change and efficiency in the use of resources and raw materials”. There are three types of scale: hillside, first order basin and región, studied for researchers of Politechnic University of Catalonia. This work of end of master is developing through experimental data on real scale on embankment designed by (Oorthius, 2016) located on Agrópolis. The desing consist of characteristic materials of the Llobregat delt. The process of construction, supervision, intrumentation of the non-vegetated area is presented in (Cevallos, 2017). Those Works did characterization of the material and the analysis corresponding to the first month of monitoring and performing the sensor data recorded.

Soil mechanics and hydraulic properties was define from laboratory test (edometer and triaxial test). On the other hand, design and installation of drainage system has been carry out to catch surface flow. Implementation of free software tools (Arduino board) using an ultrasound sensor installed at the end of the drain to measure the height of water in a landfill of known section. In the contour of the embankment it is proposed to install PVC pipe to quantify the infiltrated flow product of precipitation. Extension of the instrumentation in the embankment in the area with vegetation including new sensors to measure atmospheric variables and the state of the soil.

From the data obtained for one year by monitored non vegetated area a thermohydraulic coupled model was made using finite element model on Code_Bright program. Through a soil-atmosphere interaction analysis compared in situ and model variables. This variables are: soil temperature, volumetric water content and liquid pressure. The model predicted well in situ data and will lead to estimate the effect of climate change on geostructures. Since the model does not adjust to the temperature and the volumetric water content during the dry period, due to effects of deformation and hysteresis. These problems will be studied in depth in future investigations considering the effect of vegetation.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Objetivos	4
1.3	Estructura del trabajo.....	4
2	Ensayos de laboratorio	6
2.1	Ensayo edométrico	6
2.1.1	Equipo y metodología de ensayo.....	6
2.1.2	Parámetros obtenidos del ensayo edométrico y capacidad de colapso ...	7
2.1.3	Resultados obtenidos	9
2.2	Ensayo triaxial	13
2.2.1	Equipo y metodología	14
2.2.2	Resultados obtenidos	15
3	Instrumentación	19
3.1	Ubicación de los sensores en área sin vegetación y con vegetación	20
3.2	Medición de caudales	22
3.2.1	Precipitación	23
3.2.2	Infiltración	23
3.2.3	Escorrentía (flujo superficial)	26
3.2.4	Diseño del drenaje.....	28
3.3	Construcción del drenaje	30
3.4	Registro de datos	35
3.4.1	Evolución en el tiempo de las lecturas.....	35
3.4.2	Curva de retención	44
4	Modelación Termo-hidráulica (TH).....	47

4.1	Ecuaciones de gobierno	47
4.1.1	Flujo de agua j_w	47
4.1.2	Flujo de aire j_a	48
4.1.3	Flujo de energía J_e	49
4.2	Geometría y condiciones de contorno.....	53
4.2.1	Geometría	53
4.2.2	Malla de elementos finitos	53
4.2.3	Condiciones iniciales	54
4.2.4	Condiciones de contorno	55
4.3	Parámetros del material.....	57
5	Resultados y análisis	62
5.1	Temperatura	62
5.2	Contenido volumétrico de agua	69
5.3	Presión de líquido.....	74
5.4	Proceso de infiltración simulado	78
6	Conclusiones y líneas de trabajo futuras	85
6.1	Conclusiones	85
6.2	Líneas de trabajo futuras	87
	Bibliografía.....	88
	Anexo 1 Formulación Termo- Hidro- Mecánica (THM)	91
	Anexo 2 – Ensayo triaxial drenado – CD.....	97
	Anexo 3 Ensayo triaxial no drenado – CU.....	100
	Anexo 4 Proceso de infiltración simulado.....	106
	Anexo 5 Planos.....	130

Agradecimientos

En las siguientes líneas expreso unas palabras de gratitud, primeramente, a *Dios* por ser la base de mi moral que me permite despertar cada mañana con vida, salud y fuerzas para luchar por mis metas y sueños a alcanzar.

Gracias a la UPC por abrirme las puertas y permitir mi formación en tan prestigiosa institución. En ella doy gracias a todos los docentes investigadores que supieron brindarme las enseñanzas necesarias para mi fortalecimiento profesional.

Agradezco a todas las personas que fueron partícipes del “Proyecto SMuCPhy”, quienes de manera directa o indirecta realizaron su gran aporte, que hoy se ve reflejado en la culminación de mi trabajo de fin de máster.

Gracias a mis padres y hermanos, que fueron a la distancia mis mayores promotores y apoyo durante este proceso.

A mi esposa, quién es la mayor inspiración y motivación en mi vida, que me impulsa a alcanzar mis objetivos planteados.

Este momento especial espero, perduró en el tiempo, no solo en la mente de las personas a quienes agradecí, sino también a quienes invirtieron su tiempo para echarle una mirada a mi trabajo de fin de máster.

1 Introducción

1.1 Antecedentes

La interface suelo-vegetación-atmósfera es un problema complejo que requiere un análisis minucioso de los factores que intervienen en el intercambio de masa y energía que dependen de distintos factores climáticos como la precipitación, humedad relativa, temperatura del medio, radiación, viento y la vegetación, todos estos sufren y sufrirán modificaciones debidas al cambio climático que experimenta la Tierra por la acción del hombre. Un claro ejemplo son los desastres naturales provocados en taludes y/o laderas naturales y artificiales por fuertes precipitaciones y cambios de temperatura que provocan humectación (mojado) y secado en suelos que se encuentran en condiciones no saturadas (Hovius, Stark, and Allen 1997), (Olivares and Picarelli 2003). La evaluación de las precipitaciones sobre la distribución de la presión intersticial en laderas permite el análisis de la estabilidad y estrategias de gestión (Rahardjo, Leong, and Rezaur 2008).

El monitoreo en tiempo real de los cambios ambientales que experimenta la Tierra es clave fundamental a la hora de analizar la repuesta de los suelos no saturados frente a cambios climatológicos. Hoy en día existen herramientas que permiten realizar una modelación numérica correcta de los flujos de masa y energía en la interface y calibrar esos modelos a partir de las mediciones realizadas “in situ”. Estos modelos, una vez validados y calibrados, se pueden utilizar para predecir a largo plazo en el tiempo los cambios en el comportamiento termo-hidro-mecánico de los suelos no saturados en laderas naturales.

Estudios recientes sobre factores desestabilizadores como el agrietamiento por desecación (secado) y proceso de infiltración (mojado) en ciclos repetitivos inducidos por el cambio climático alteran las propiedades mecánicas e hidráulicas creando planos de debilidad y cambios en la presión intersticial del suelo. La erosión es el resultado de los daños y fallas de la estructura de la tierra que afecta a la estabilidad de las laderas (Tang et al. 2018). Distintos estudios de la erosión en pendientes diseñadas se presenta en (De Oña, Ferrer, and Osorio 2011), (Eugeniusz and Piotr 2018). El estudio de la vegetación en laderas para incluir en el análisis de estabilidad (Askarinejad et al. 2012).

En el presente TFM se analiza la interacción suelo-vegetación-atmósfera a partir de mediciones realizadas en el proyecto denominado SMuCPhy, en inglés Slope Mass-wasting Under climate Change. Physical mechanisms, predictive modelling and possible mitigation strategies”, traducido al español es “Pérdida de suelos en laderas debido al cambio climático. Procesos físicos, modelización predictiva y posibles estrategias de mitigación” en donde se realiza el monitoreo en áreas de un terraplén experimental con vegetación y sin vegetación que están bien identificadas. El diseño del terraplén ha sido desarrollado en el TFM de (Oorthuis 2016) la supervisión de la construcción, calibración y colocación de la instrumentación para monitorizar el comportamiento de los taludes en

el área sin vegetación han sido descritos por (Cevallos 2017). En este documento se presentan los trabajos de laboratorio realizados para completar la caracterización del suelo de dicho terraplén, los trabajos de campo realizados para incrementar la instrumentación “in situ” y el análisis numérico de la interacción suelo-vegetación-atmósfera mediante el programa de elementos finitos Code_Bright, (Olivella et al. 1996). Este programa de cálculo permite realizar un acoplamiento Termo-Hidro-Mecánico (THM) pero en este trabajo sólo se utilizará la parte de Termo-Hidráulica (TH), lo que permite comprender y predecir el comportamiento de los suelos no saturados que constituyen los taludes del terraplén. A continuación, se presenta un breve resumen de la formulación matemática que se utiliza en la modelación.

Las laderas responden a los cambios de presión de poros frente a procesos de precipitación y/o elevación del nivel de agua por ejemplo en embalses. En las capas superiores del suelo es en donde se produce el intercambio de agua con la atmósfera mediante procesos de infiltración, evaporación del agua de los poros por acción de la radiación neta y la transpiración a través de la vegetación que también intercepta parte de la lluvia limitando la escorrentía y liberando vapor de vuelta a la atmósfera. A su vez la vegetación proporciona refuerzo por las raíces, asentamientos (desección) y cambios de la permeabilidad del suelo. A todo este proceso se denomina “interacción pendiente-atmósfera” de acuerdo a (Elia et al. 2017). La consecuencia de esta interacción son cambios en las condiciones de tensión-deformación del suelo debido a los cambios de presión de poros que generan inestabilidad y la variación de las fuerzas de cizallamiento movilizadas frente a las fuerzas de cizalladura disponibles pudiendo dar paso al inicio de lo que se denomina falla progresiva (Alonso, Pinyol, and Puzrin 2010).

En la Figura 1 se presenta un esquema de los fenómenos físicos que intervienen en la transferencia de agua en un medio poroso no saturado. En estos fenómenos intervienen factores dependientes del suelo como la succión ($P_g - P_l$), la permeabilidad del material, ubicación del nivel freático y la pendiente del talud y factores dependientes de las condiciones atmosféricas como las precipitaciones, la temperatura y la evaporación. La infiltración del agua es resultado de la precipitación y/o escorrentía a través del medio poroso que es modificada por la inclinación del talud y el drenaje. La ascensión del agua por capilaridad depende esencialmente de la geometría de los poros. La zona donde se producen estos distintos intercambios de masa y energía se denomina zona vadosa donde la dinámica del contenido de humedad se vuelve un desafío por distintas razones: condiciones del lugar, plantas vivas en las cuales las propiedades fisiológicas, morfológicas y fenológicas varían entre individuos, limitaciones impuestas por las tecnologías de sensores, técnicas de medición y la necesidad de escalar conjuntos de datos escasos de baja resolución que consisten en mediciones puntuales recopiladas sobre grandes áreas espaciales (Trautz et al. 2017). Las principales variables que definen el problema THM es la presión del líquido P_l (kPa) la presión de gas P_g (kPa) la temperatura T (°C) y los desplazamientos u (m) de la fase sólida. Code_Bright permite

realizar este acoplamiento utilizando las ecuaciones de gobierno que se presentan en la tabla 1 y su formulación matemática en el Anexo 1.

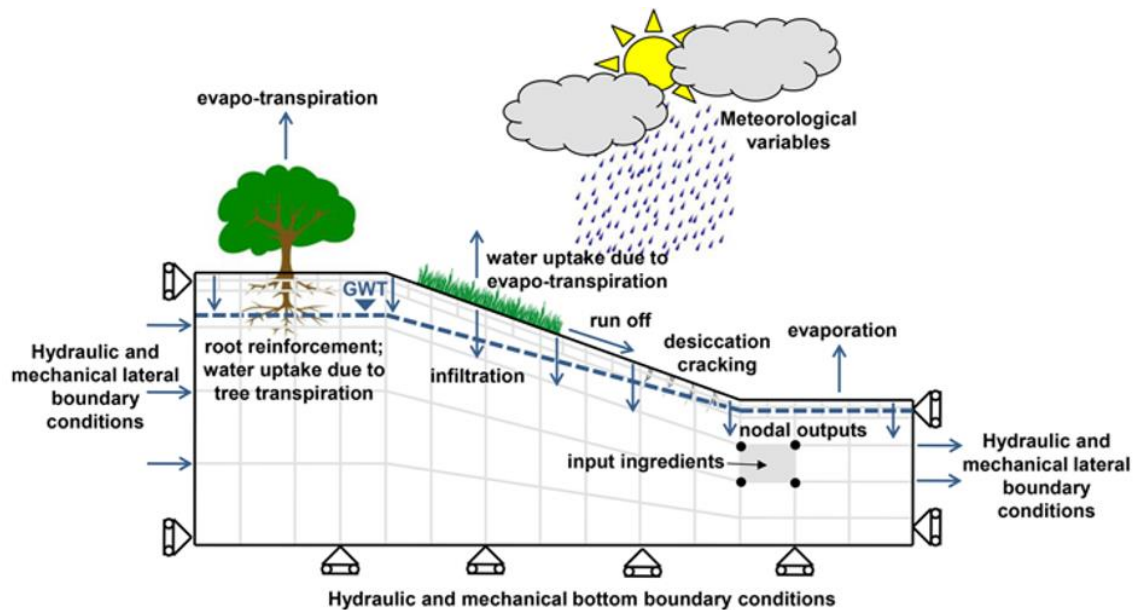


Figura 1. Modelo esquemático de la interacción pendiente-vegetación-atmósfera (Elia et al. 2017).

Tabla 1. Ecuaciones de gobierno.

Ecuaciones de Gobierno*	Variable	Notación
- Ecuaciones de equilibrio		
- Balance de masa de agua	Presión del líquido	P_l
- Balance de masa de aire	Presión de gas	P_g
- Balance de momento del medio	Desplazamientos	u
- Balance de energía interna	Temperatura	T
- Ecuaciones Constitutivas		
- Ley de Darcy	Flujo advectivo de líquido y gas	q_l, q_g
- Ley de Fick	Flujo no advectivo de vapor y aire	i_g^w, i_g^a
- Ley de Fourier	Flujo conductivo de calor	i_c
- Curva de retención	Grado de saturación en fase líquida	S_l, S_g
- Modelo constitutivo mecánico	Tensor de tensiones	σ
- Restricciones de equilibrio		
- Ley psicométrica	Fracción de masa disuelta en aire	ω_g^w
- Ley de Henry	Fracción de masa de vapor	ω_l^a

Para realizar el acoplamiento THM el modelo requiere una discretización del medio poroso mediante una malla de elementos finitos, condiciones iniciales y de contorno que dependen del equilibrio entre los flujos de energía que tienen lugar en la superficie y se detallan en el apartado correspondiente a modelación.

1.2 Objetivos

El principal objetivo del presente trabajo es realizar un análisis de la interacción suelo-atmósfera en el terraplén experimental a partir de los datos registrados por los sensores en el área no vegetada y su modelación numérica Termo-Hidráulica utilizando el programa de elementos finitos Code_Bright.

De este objetivo se derivan algunos objetivos específicos:

- ✓ Determinar las propiedades mecánicas del suelo que conforma el terraplén experimental.
- ✓ Diseñar e instalar un sistema de drenaje del talud y recogida de agua de escorrentía.
- ✓ Instalar instrumentación en las zonas con vegetación.
- ✓ Control y análisis de datos obtenidos por los sensores.
- ✓ Modelar el comportamiento Termo –Hidráulico bajo condiciones actuales en el área sin vegetación.

1.3 Estructura del trabajo

El presente trabajo se ha dividido en seis capítulos que se describen a continuación:

En el capítulo 2 se presenta el resultado de los ensayos de laboratorio realizados para determinar las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo limo arenoso del terraplén experimental. Así del ensayo edométrico se obtienen los índices C_c , C_s , la presión de preconsolidación σ'_p , el coeficiente de consolidación c_v , el módulo edométrico E_m , la permeabilidad saturada del suelo k , la compresibilidad con succión nula $\lambda(0)$, y la capacidad de colapso. Además, se han realizado ensayos triaxiales en condiciones drenadas y no drenadas hasta llegar a rotura obteniendo los parámetros de K , E , G , k , ϕ , ν y los coeficientes de compresibilidad κ y λ .

En el capítulo 3 se describe la ubicación de los sensores en el área sin y con vegetación, se presenta el sensor para registros de la precipitación en la estación meteorológica METEO ubicada en el centro del terraplén y se propone un sistema para la recolección de agua de infiltración al pie de cada talud. La infiltración se estima a partir de la permeabilidad del suelo, se diseña el sistema de drenaje que recoge la escorrentía en cada talud del terraplén y se describe el sensor que se utiliza para medir el caudal estimado de diseño. Finalmente se presenta el resultado de las mediciones realizadas in situ en el área no vegetada en el talud norte y sur que corresponden a: temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua (VWC), presión de líquido, relación entre el VWC y la presión del líquido, temperatura ambiente, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento y flujo de calor.

En el capítulo 4 se presenta la formulación matemática, las ecuaciones de gobierno, los flujos que intervienen en la condición de contorno atmosférica, para aplicar en el contorno de cada talud del terraplén experimental. Además, se describe la geometría, malla de elementos finitos, condiciones iniciales, condiciones de contorno y los parámetros del material que se utiliza para la modelación numérica Termo-Hidráulica (TH) en el programa Code_Bright para cada talud.

En el capítulo 5 se realiza el análisis de los resultados de la modelación Termo-Hidráulica comparando con los datos registrados de los sensores a distinta profundidad de: temperatura del suelo, contenido volumétrico de agua (VWC) y presión de líquido. Finalmente se elige el talud norte para analizar el proceso de infiltración conjuntamente con la variación de la temperatura del suelo, grado de saturación y presión de líquido a partir del modelo planteado (TH) frente a una intensa etapa de precipitación en el mes de octubre de 2017.

Finalmente, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones del trabajo y las líneas de investigación abiertas.

El documento se completa con las referencias bibliográficas y 5 anexos que incluyen la formulación detallada del modelo numérico, resultados de ensayos de laboratorio y planos con la situación de la instrumentación colocada en el terraplén.

2 Ensayos de laboratorio

Con la finalidad de conocer el comportamiento mecánico e hidráulico del suelo que conforma el terraplén se realiza ensayos edométricos y triaxiales en condiciones drenadas y no drenadas que se detallan en los siguientes apartados.

2.1 Ensayo edométrico

Para obtener el coeficiente de compresibilidad λ (0) con succión nula se realiza el ensayo edométrico en condiciones saturadas a partir de una muestra alterada de arcilla de bajo límite líquido, densidad seca e índice de vacíos conocidos, la muestra se tamiza por el tamiz # 4 para evitar tamaños excesivos de partículas, los datos iniciales de la pastilla de suelo se indican en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos iniciales.

ítem	Símbolo	Inicial	Und.
Peso específico seco	γ_d	15,5	kN/m ³
Peso específico de las partículas	γ_{suelo}	26,5	kN/m ³
Humedad	ω	18,0	%

2.1.1 Equipo y metodología de ensayo

Edómetro ET1.- Este equipo se utiliza para realizar el ensayo de consolidación unidimensional aplicando distintos escalones de carga descritos en la Tabla 3. La carga se aplica en la parte superior de la probeta a través de un pistón metálico con un sistema de palanca. En el puente de carga se coloca un deformímetro para medir los desplazamientos producidos por la carga. Para evitar las vibraciones durante el ensayo se dispone de una bancada rígida sobre la cual se ajusta el equipo como se indica en la Figura 2.



Figura 2. Equipo (Edómetro ET1).

La célula edométrica está conformada por:

- Base metálica.
- Cuerpo lateral de cierre formando con la base un recipiente estanco.
- Anillo rígido (Diámetro de 5 cm y altura de 2 cm).
- Dos placas porosas

Tabla 3. Escalones de carga.

Escalón	Día		Carga sobre la muestra	Carga acumulada en el plato	Pesas nuevas a poner	Pesas acumuladas
			kPa	kg	kg	kg
	15	viernes	5	0,1	0,1	Saturación
1	16	Sábado	10	0,2	0,2	0,2
2	17	Domingo	20	0,4	0,2	0,2+0,2
3	18	Lunes	50	1	0,6	0,2+0,2+0,6
4	19	Martes	100	2	1	0,2+0,2+0,6+1
5	20	Miércoles	200	4	2	0,2+0,2+0,6+1+2
6	21	Jueves	400	8	4	0,2+0,2+0,6+1+2+4
7	22	Viernes	849	17	9	0,2+0,2+0,6+1+2+4+8
8	23	Sábado	1649	33	17	0,2+0,2+0,6+1+2+4+8+17
9	24	Domingo	400	8	-25	0,2+0,2+0,6+1+2+4
10	25	Lunes	50.0	1	-7	0,2+0,2+0,6
11	26	Martes	10.0	0,2	-0,8	0,2

Metodología de ensayo. - A partir de una muestra compactada estáticamente se obtiene la pastilla de suelo en el anillo de dimensiones estándar de 2 cm de altura y 5 cm de diámetro interior. Al realizar el montaje de la célula edométrica se coloca una piedra porosa en la parte superior e inferior de la pastilla dentro de la célula edométrica y se coloca en la base para equilibrar la viga de carga y proceder a tomar la lectura inicial. Para garantizar la saturación del suelo se inunda la muestra con agua durante 24 horas.

Los escalones de carga se aplican como se indica en la Tabla 3. La duración de cada escalón de carga es de 24 horas. Para todo escalón de carga se realiza la lectura de la deformación durante la primera media hora en los siguientes tiempos: 10 s, 15 s, 20 s, 30 s, 45 s, 60 s, 75 s, 90 s, 2 min, 3 min, 4 min, 5 min, 7 min, 10 min, 15 min, 20 min y 30 min y las demás lecturas se realiza cada dos horas en el transcurso del día. En los escalones de descarga se realiza la lectura al cabo de 1 minuto y al final para realizar la lectura se graba (filmadora) el movimiento de la aguja del deformímetro durante los dos primeros minutos. Al finalizar el proceso de descarga se toman cuatro diferentes medidas de la altura de la probeta para saber cuánto ha disminuido la superficie de la probeta y compararla con la deformación obtenida en el edómetro además para conocer la humedad final se coloca en el horno durante 24 horas la pastilla de suelo.

2.1.2 Parámetros obtenidos del ensayo edométrico y capacidad de colapso

Una manera de determinar los parámetros del suelo tomando como referencia los desplazamientos verticales medidos con el ensayo edométrico, es utilizar la ecuación

de la consolidación, que predice los asentamientos para un determinado tiempo que depende del coeficiente de consolidación c_v , módulo edométrico E_m y coeficiente de consolidación secundaria C_α , para ajustar los parámetros hasta que los valores medidos y los teóricos presenten la menor diferencia posible. Con este fin se emplea el método de mínimos cuadrados, en el cual se busca que la sumatoria de la diferencia de los cuadrados entre el valor medido y teórico sea la mínima posible. Utilizando una hoja de cálculo Excel y la herramienta *Solver* se encuentran los valores que minimizan la suma del error una vez ingresados unos parámetros iniciales de referencia. El desplazamiento vertical se calcula con la fórmula general:

$$\delta_{(t)} = \delta_o + \frac{2H\Delta\sigma}{E_m} U(T) + 2HC_\alpha \log\left(\frac{t}{t_{90}}\right) = M(\delta_o, E_m, c_v, C_\alpha) = M(p) \quad (1)$$

Además:

$$t_{90} = \frac{0,848H^2}{c_v} \quad [\text{min}] \quad (2)$$

$$T = \frac{c_v t}{H} \quad [-] \quad (3)$$

$$U(T) = \frac{2\sqrt{T}}{\sqrt{\pi}}; T \leq 0,2 \quad [-] \quad (4)$$

$$U(T) = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{\left(-\frac{\pi^2}{4}T\right)}; T > 0,2 \quad [-] \quad (5)$$

Dónde:

- Desplazamiento vertical en un tiempo determinado $\delta_{(t)}$.
- Desplazamiento vertical inicial δ_o .
- Altura de drenaje H .
- Carga aplicada $\Delta\sigma$.
- Módulo edométrico E_m .
- Grado de consolidación $U(T)$.
- Tiempo donde ha ocurrido el 90% del asentamiento t_{90} .
- Coeficiente de consolidación c_v .
- Coeficiente de consolidación secundaria C_α .

Si el tiempo es menor que el t_{90} se omite el término de la consolidación secundaria, reduciendo la ecuación general a:

$$\delta_{(t)} = \delta_o + \frac{2H\Delta\sigma}{E_m} U(T) \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

La estimación de los parámetros $M(p) = M(\delta_o, E_m, c_v, C_\alpha)$, proporciona un ajuste tal que el modelo teórico se aproxima perfectamente a los valores medidos (ver Figura 3)

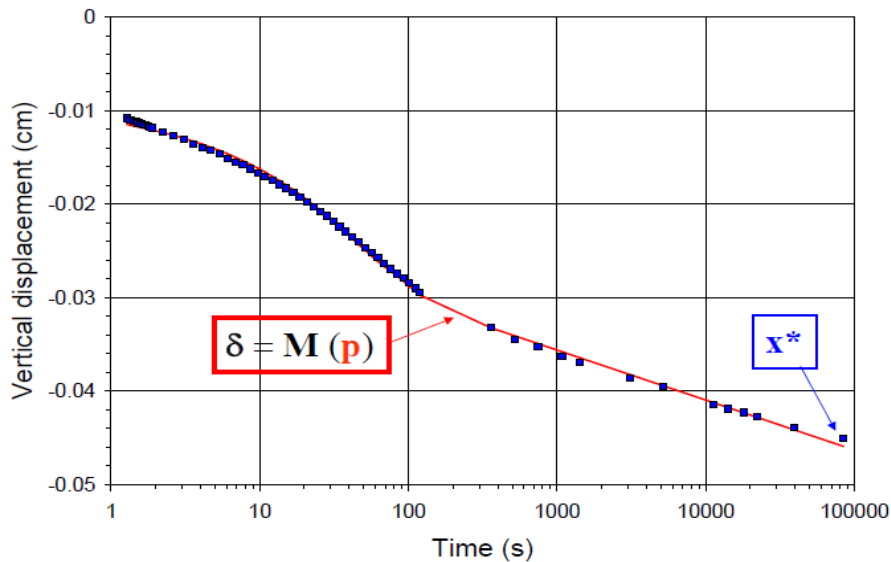


Figura 3. Ejemplo de ajuste con mínimos cuadrados (Apuntes de mecánica de suelos avanzada 2017)

La permeabilidad del suelo se puede obtener de manera indirecta a partir de la siguiente expresión:

$$k = \frac{c_v \gamma_w}{E_m} \quad [\text{m/s}] \quad (7)$$

Capacidad de colapso del suelo

Para estudiar el cambio de volumen que experimenta el suelo frente a la saturación brusca y bajo carga externa constante se estudia su capacidad de colapso o hinchamiento a partir de una humedad constante. Se satura el suelo en las cargas correspondientes a 20 kPa y 100 kPa y se continua con los escalones de carga en condiciones saturadas indicados en la Tabla 3, este procedimiento se realiza con distintas humedades (18%, 14%, y 10%).

2.1.3 Resultados obtenidos

Curva e vs. $\log \sigma'$, C_c , C_s , σ'_p

Del ensayo edométrico se obtiene los valores de C_c , C_s y σ'_p , aplicando el método de Casagrande descrito en (Das 1985) a partir de la curva e vs. $\log \sigma'$ donde cada escalón de carga representa un punto en la gráfica medido en un intervalo de 24 horas a partir de los datos iniciales de la Tabla 4.

Tabla 4. Datos iniciales para el gráfico e vs. $\log \sigma'_p$.

Ho (mm)	20
Lec. Inicial	8710
e_o	0,73
Lec. Final	4611
Hf (mm)	15,90

Tabla 5. Asientos e índices de vacíos finales en la probeta por escalón de carga.

#	Carga (kPa)	Lectura final (24h)	Δh (mm)	Δe	e
1	10	8639	0,071	0,01	0,72
2	20	8521	0,189	0,02	0,71
3	50	7890	0,820	0,07	0,65
4	100	7088	1,622	0,14	0,59
5	200	6299	2,411	0,21	0,52
6	400	5570	3,140	0,27	0,45
7	799	4891	3,819	0,33	0,40
8	1649	4241	4,469	0,39	0,34
9	400	4291	4,419	0,38	0,34
10	50	4469	4,241	0,37	0,36
11	10	4572	4,138	0,36	0,37

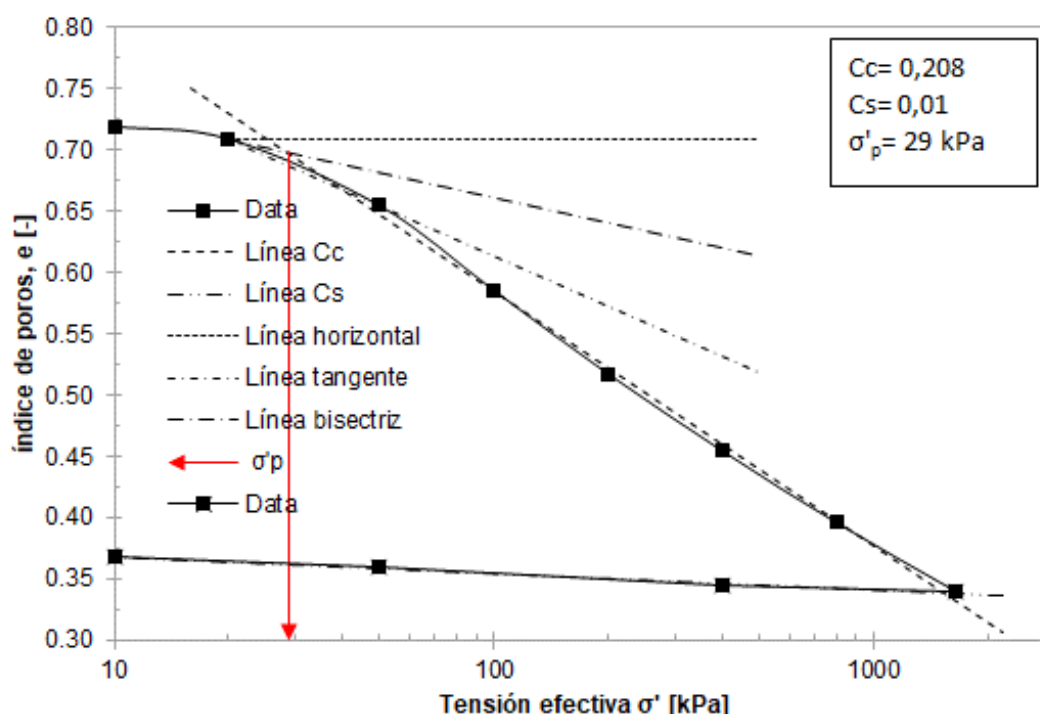


Figura 4. Curva característica del ensayo edométrico e vs. $\log \sigma'$.

Con la finalidad de comprender el comportamiento hidráulico del suelo se determina de manera indirecta la permeabilidad del suelo a partir del ensayo realizado y los parámetros obtenidos de c_v y E_m mediante el método de mínimos cuadrados que se presentan en la Tabla 6 que se relacionan con el índice de vacíos en la Figura 5.

Tabla 6. Resultados obtenidos.

#	Carga (kPa)	e	Mínimos cuadrados			
			c_v (cm ² /s)	E_m (MPa)	C_α	k (m/s)
1	10	0,72	$7,4 \cdot 10^{-03}$	24,4	$6,4 \cdot 10^{-04}$	$3,0 \cdot 10^{-10}$
2	20	0,71	$5,6 \cdot 10^{-04}$	4,5	$1,4 \cdot 10^{-03}$	$1,2 \cdot 10^{-10}$
3	50	0,65	$5,9 \cdot 10^{-03}$	2,5	$4,0 \cdot 10^{-03}$	$2,4 \cdot 10^{-09}$
4	100	0,59	$6,7 \cdot 10^{-03}$	3,4	$4,8 \cdot 10^{-03}$	$1,9 \cdot 10^{-09}$
5	200	0,52	$6,7 \cdot 10^{-03}$	7,4	$4,1 \cdot 10^{-03}$	$8,8 \cdot 10^{-10}$
6	400	0,45	$1,0 \cdot 10^{-02}$	18,2	$3,8 \cdot 10^{-03}$	$5,4 \cdot 10^{-10}$
7	799	0,40	$6,3 \cdot 10^{-03}$	44,4	$3,4 \cdot 10^{-03}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$
8	1649	0,34	$5,8 \cdot 10^{-03}$	98,8	$3,3 \cdot 10^{-03}$	$5,8 \cdot 10^{-11}$

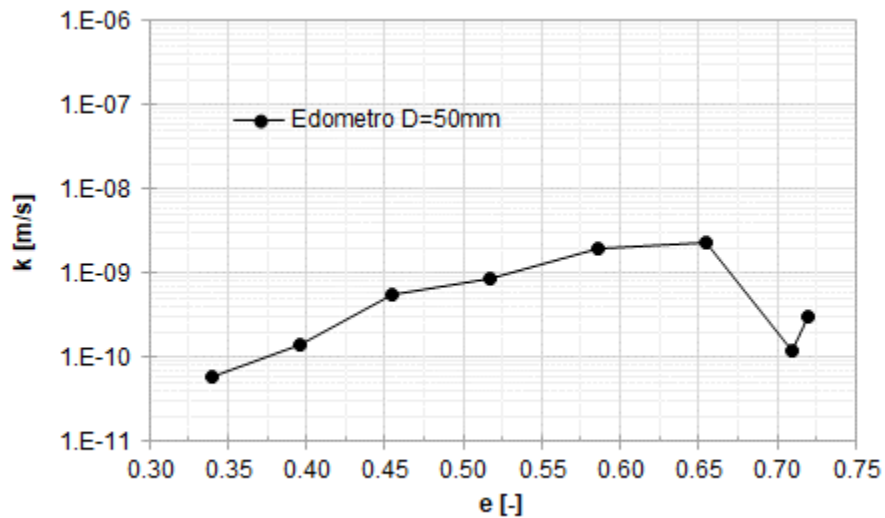


Figura 5. Permeabilidad k vs índice de vacíos e .

De acuerdo a la Figura 5 los puntos que están fuera de la alineación con la recta que forman los demás escalones en la gráfica corresponden a los dos primeros (10 y 20 kPa) que se puede decir que son cargas muy pequeñas que el suelo experimenta un cambio de volumen como sucede con los demás escalones de carga.

Curva e vs $\ln \sigma'$

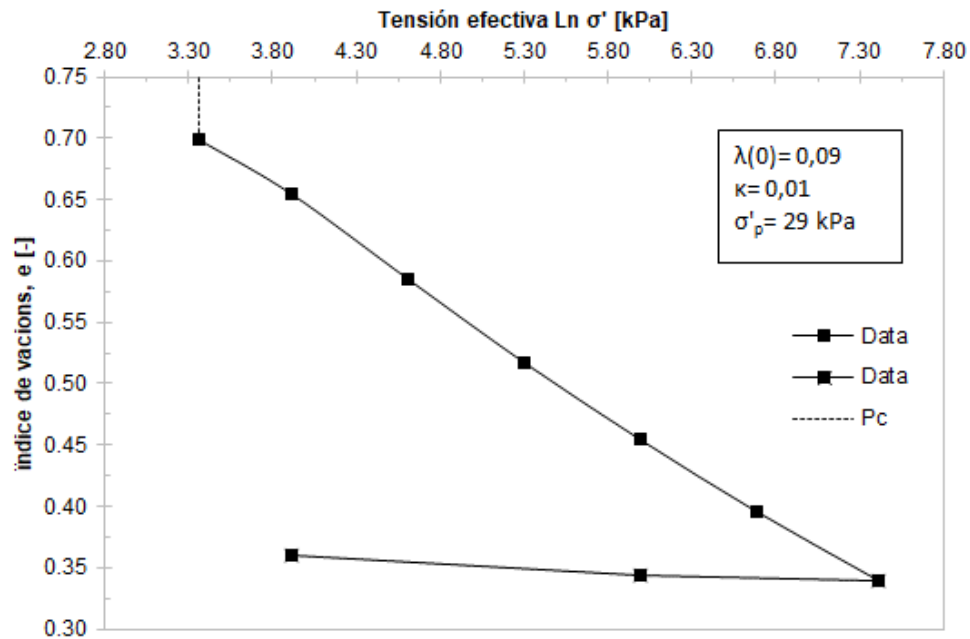


Figura 6. Coeficiente de compresibilidad para el estado saturado $\lambda(0)$ a lo largo de la carga virgen y a lo largo de las trayectorias de tensión elásticas (descarga / recarga) κ .

Capacidad de colapso

En la Figura 7 se presenta el resultado del ensayo edométrico en condiciones saturadas, tres ensayos realizados con humedad constante (10%, 14%, 18%) y dos ensayos de capacidad de colapso para un suelo limoso del delta de Llobregat. De los ensayos a humedad constante podemos ver como la pendiente de la línea de compresión va aumentando conforme la humedad disminuye lo que indica que el suelo cada vez es menos compresible. Si analizamos la carga de 200 kPa para los tres ensayos realizados existe mayor cambio de volumen para la humedad de 18% y menor para el 10% de humedad que se observa tanto en la rama de carga como en la descarga.

La capacidad de colapso que presenta el suelo del terraplén experimental con humedad inicial de 14% para una carga igual a 20 kPa es 0,7 % y 8% para una carga de 100 kPa.

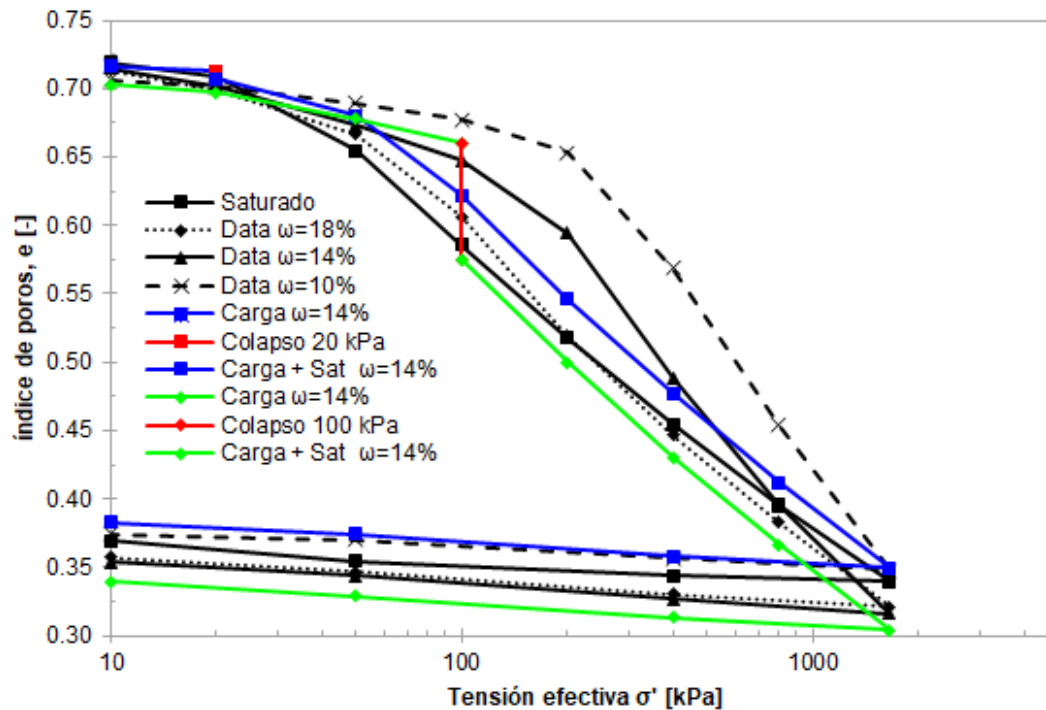


Figura 7. Curva e vs. $\log \sigma'$ y capacidad de colapso.

2.2 Ensayo triaxial

El ensayo triaxial permite reproducir en laboratorio diferentes escenarios de carga esperados in situ como compresión y/o extensión a partir de probetas de suelo, brindándonos datos que podemos interpretar en términos de modelo de estado crítico para fines de diseño de ingeniería. Los parámetros que se obtienen mediante este ensayo son: K , E , G , k , ϕ , v y los coeficientes de compresibilidad κ y λ . Cabe resaltar que los valores de E y v varían según sean las condiciones no drenadas o drenadas. A partir de una muestra de suelo de limo arcilloso alterada de Agrópolis con parámetros conocidos indicados en la Tabla 2 se realiza dos ensayos en condiciones no drenadas (CU) y uno en drenadas (CD) hasta llegar a rotura con confinamiento efectivo de 50 kPa. En la siguiente Tabla 7 se presenta el resumen de los datos de las probetas ensayadas.

Tabla 7. Parámetros iniciales.

ítem	Símbolo	CU 1	CU 2	CD	Und.
Altura inicial	H_0	100	100	100	mm
Diámetro inicial	D	50,1	50,1	50,1	mm
Masa del suelo seco	-	309,27	312,14	311,8	g
Gravedad específica	G_s	27	27	27	-
Densidad natural	ρ_n	18,6	18,7	18,7	kN/m ³
Densidad seca	ρ_d	15,7	15,8	15,8	kN/m ³
Humedad natural	ω	18,3	18,1	18,3	%
Índice de poros	e	0,72	0,71	0,71	-
Saturación	S_r	68	69	70	%

2.2.1 Equipo y metodología

Equipo.- Para realizar el ensayo se utiliza el equipo triaxial GDS fabricado por la empresa GDS Instruments Ltd. diseño inspirado en el clásico triaxial tipo “stress path” de Bishop y Wesley, que se indica en la Figura 8. Todos los transductores de presión y desplazamiento, así como los pistones que suministran la presión, están conectados a un sistema de adquisición de datos que permite controlar las diferentes etapas del ensayo mediante un ordenador; también se pueden programar múltiples trayectorias tensionales y almacenar en tiempo real las diferentes variables medidas durante el ensayo en vista a un posterior procesamiento de datos. Las características del equipo se detallan en la guía de laboratorio (Lloret 2017).

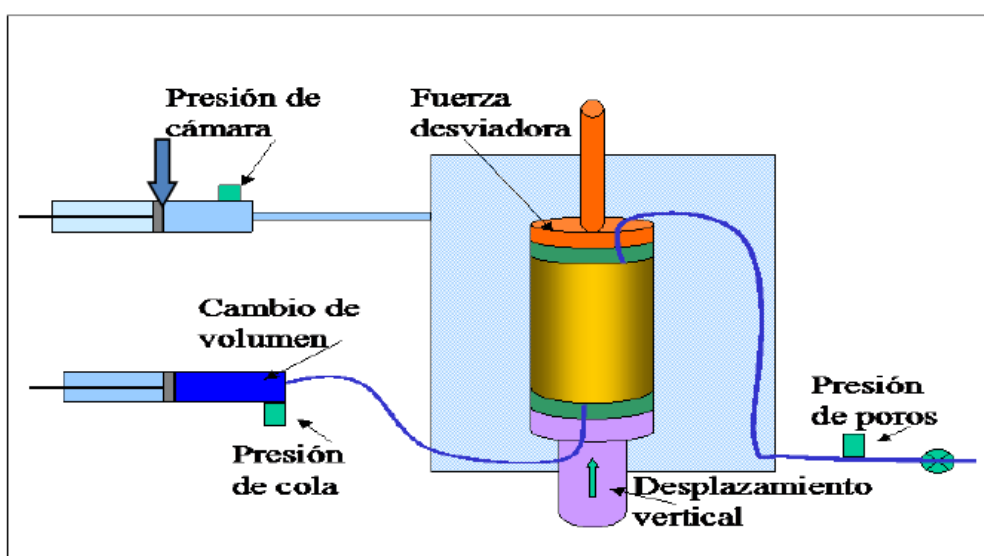


Figura 8. Esquema general de la célula triaxial.

Metodología. - El ensayo triaxial se realiza en tres fases. En la primera se satura la muestra y se evalúa el valor de la permeabilidad a partir del caudal que atraviesa la probeta bajo un gradiente de alturas piezométricas impuesto. Al final de esta fase se verifica el valor B de Skempton para comprobar que la muestra esté saturada. La segunda etapa se procede a la consolidar la muestra isotrópicamente finalmente en la

tercera fase se lleva la muestra a rotura dependiendo de las condiciones drenadas y no drenadas, en la Tabla 8 se resumen las distintas fases del ensayo

Tabla 8. Fases del ensayo triaxial.

Fase	Etapas	Descripción
1	Saturación inicial	Consiste en la saturación completa de la muestra para lo cual se aplica una presión de cámara y se impone un flujo desde el borde inferior de la probeta hacia el borde superior que está en contacto con la atmósfera. Una vez saturada la muestra se calcula el valor de la permeabilidad k .
	Rampa de saturación	Se cierra la salida del agua al exterior y se procede a la elevación simultánea y lineal con el tiempo la presión de cola y la presión de confinamiento. Una vez que se alcanza estos valores de presión, se comprobará que el sistema (muestra + conducciones) no contiene aire evaluando el parámetro B de Skempton.
2	Consolidación isotrópica	Drenado CD. - La velocidad de carga se impone de forma que la presión de poros medida en el borde alejado del drenaje no supere en 30 kPa a la presión de cola impuesta en el extremo opuesto de la probeta. La consolidación se realiza hasta alcanzar una tensión efectiva de 140 kPa y con la finalidad de evaluar el módulo elástico de deformación volumétrica se realiza una descarga cuando se hayan alcanzado 190 kPa de confinamiento efectivo. La descarga se lleva hasta una presión de confinamiento de 50 kPa.
		No drenado CU. - Se cierra el drenaje y se aplica un incremento de la presión de cámara.
3	Rotura drenada	Se aplica un aumento de la deformación axial a una velocidad de (0,002 mm/min) con un drenado total para asegurar que la presión de poros en la muestra permanezca constante, si la presión de poros se incrementa más de 10 kPa esta velocidad se reduce automáticamente.
	Rotura no drenada	Para llegar a rotura se cierra el drenaje y se aplica un aumento de la deformación axial a una velocidad de (0,1 mm/min). La presión de cámara se mantiene constante y la deformación axial máxima en esta fase será del orden del 20%.

2.2.2 Resultados obtenidos

Aplicando la metodología descrita en el punto anterior todos los ensayos realizados inician con la etapa de saturación inicial en condiciones drenadas y no drenadas respectivamente, imponiendo un caudal constante en la probeta para su saturación mientras que el valor de confinamiento se mantiene. El parámetro de permeabilidad k de la probeta se estima en un tiempo t bajo un gradiente de alturas piezométricas impuestas, este valor se encuentra en un rango de 10^{-7} m/s correspondiente a una mezcla de arena, limo y arcilla con una característica de drenaje pobre según (Terzaghi, Peck, and Mesri 1996). La comprobación del parámetro B de Skempton se realiza al incrementar la presión de confinamiento y verificar el incremento de la presión de poros que posteriormente se estabiliza, el valor calculado en todos los ensayos es superior al mínimo requerido de 0,92 para ejecutar la fase de consolidación las figuras que describen la obtención de los parámetros del suelo se presenta el anexo 2 y 3.

Consolidación isotrópica

Siguiendo la metodología antes descrita en la etapa de consolidación se obtiene el valor del módulo de rigidez K es 3,8 MPa que se estima en la rama de descarga de la curva de ε_v vs. p' .

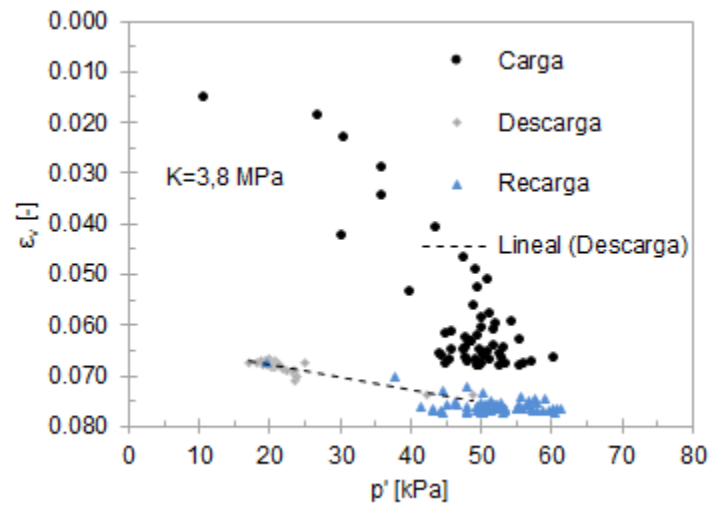


Figura 9. ε_v vs. p' durante la fase de consolidación.

En la Figura 10 se muestra la variación de e respecto a $\ln p'$, que permite calcular los parámetros λ y κ siendo 0,07 y 0,013, respectivamente.

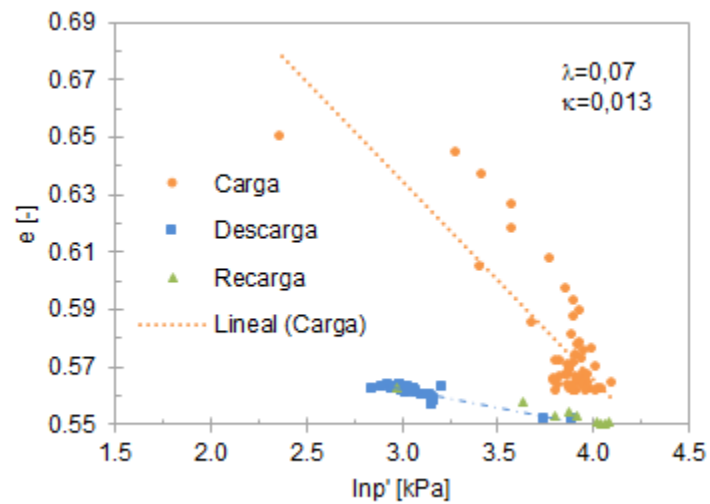


Figura 10. e vs. $\ln p'$ durante la consolidación.

Rotura CD

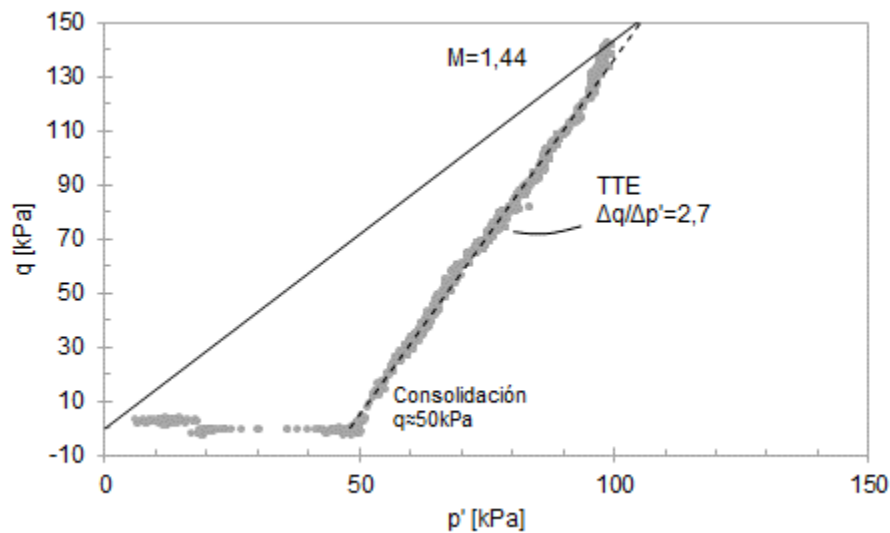


Figura 11. Trayectoria de tensiones p' vs q - ensayo CD.

Rotura CU

En condiciones no drenadas no existe cambio de volumen por cuanto las deformaciones volumétricas se mantienen constantes durante el ensayo y la presión de poros aumenta. La obtención de los módulos E_u , G y el módulo de Poisson ν se estiman a partir la Figura 80 y Figura 84 a), b) del anexo 3 calculado mediante las fórmulas de elasticidad. Cabe mencionar que no existe un módulo de corte para condiciones no drenadas, sino que es un valor único independiente de las condiciones de rotura porque no depende de la presión de poros (Wood 1990), los parámetros se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Parámetros de ensayo CU.

Ítem	Ensayo 1	Ensayo 2	Und.
E_u	47,5	11,4	MPa
G_u	15,8	3,8	MPa
q_{cv}	58	47	kPa
ν	0,50	0,50	-

Las trayectorias p' vs q de los ensayos realizados en condiciones drenadas y no drenadas se presenta en la Figura 12. El ángulo de rozamiento interno del suelo es 35,3 grados.

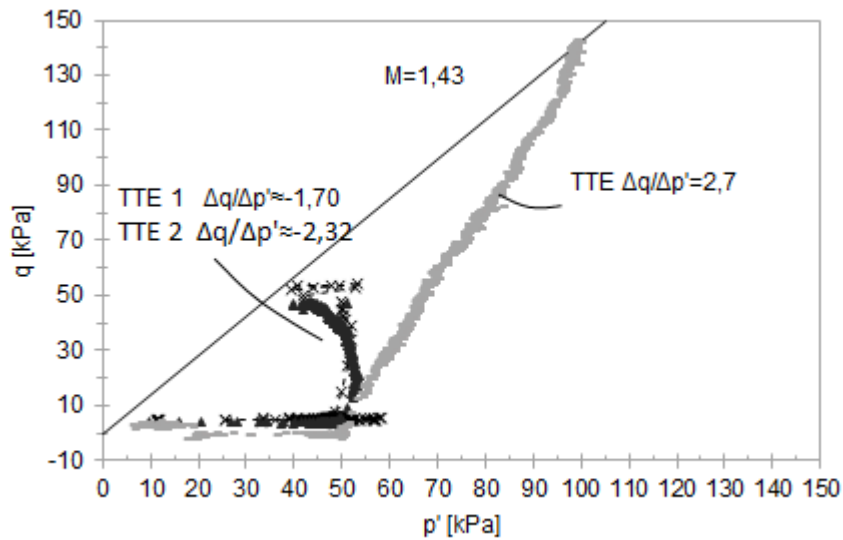


Figura 12. Trayectoria de tensiones p' , p vs q .

En la Figura 13 se presenta el resultado de las permeabilidades obtenidas del ensayo edométrico y triaxiales con densidad seca igual a $1,55 \text{ g/cm}^3$. La permeabilidad obtenida es menor a los datos obtenidos por (Cevallos 2017).

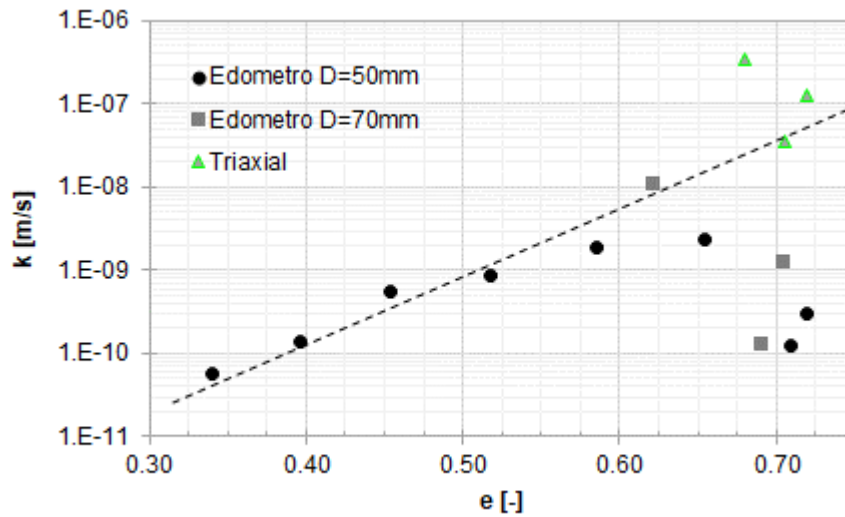


Figura 13. Resumen de la permeabilidad vs índice de vacíos obtenida indirectamente del ensayo edométrico y ensayos triaxiales.

3 Instrumentación

En la Figura 14 se presenta las dimensiones en planta del terraplén experimental identificando el área no vegetada como perfil B-B y el área vegetada en el perfil C-C las medidas de cada perfil se detalla en el plano SMuCPHy 01/04 del Anexo 5 de este documento.

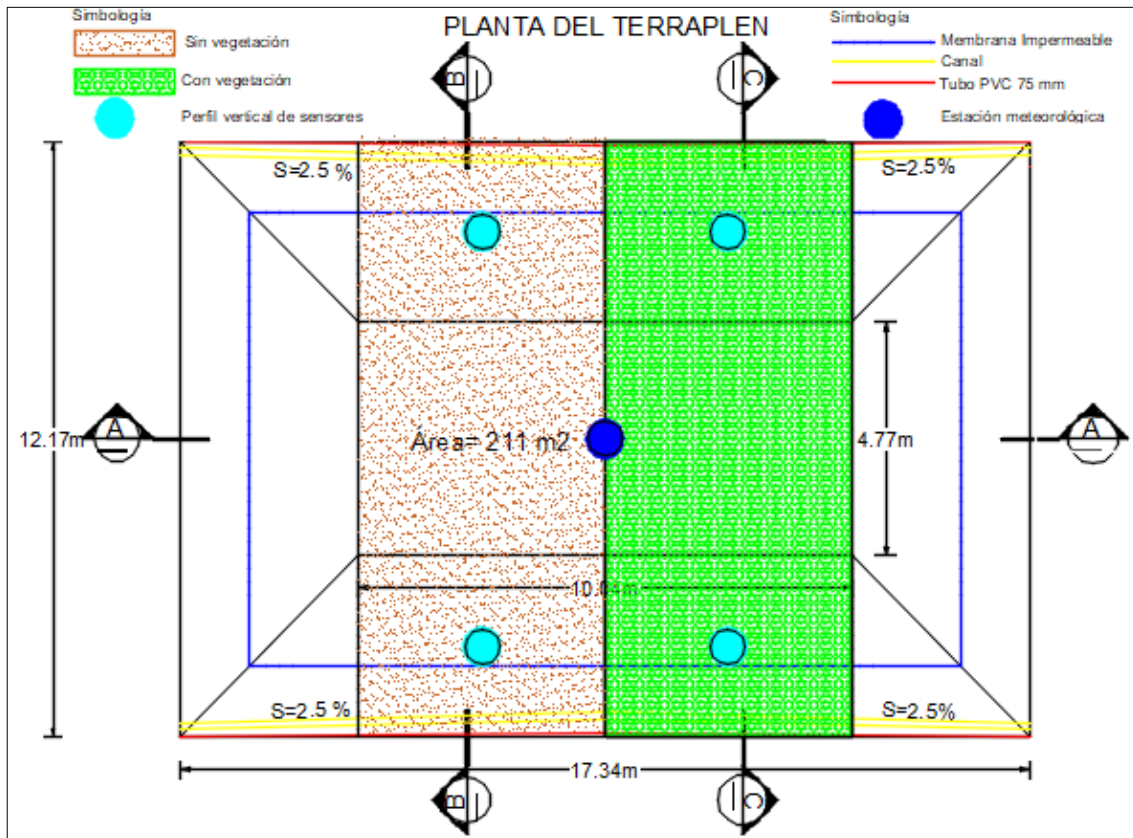


Figura 14. Planta del terraplén experimental.

La medición de variables como la temperatura, succión, contenido de humedad y factores como la precipitación, humedad relativa se han monitoreado a lo largo del tiempo a partir del 28/03/2017 en el área sin vegetación. En el área con vegetación se inicia el monitoreo a partir del 20/11/2017 utilizando el mismo tipo de sensor del área sin vegetación descritos por (Cevallos 2017) además se adiciona anemómetros para medir la velocidad y la dirección del viento tipo (Davis ISS 6160C) y flujo de calor (HFP01SC) en cada perfil del terraplén. En la estación meteorológica ubicada en el centro del terraplén se incluyó un anemómetro para medir la velocidad y dirección del viento y un sensor tipo (sun rad Davis pyranometer) para medir la radiación. En los siguientes apartados se presenta la ubicación de los sensores instalados en cada área del terraplén experimental y el resultado del monitoreo in situ.

3.1 Ubicación de los sensores en área sin vegetación y con vegetación

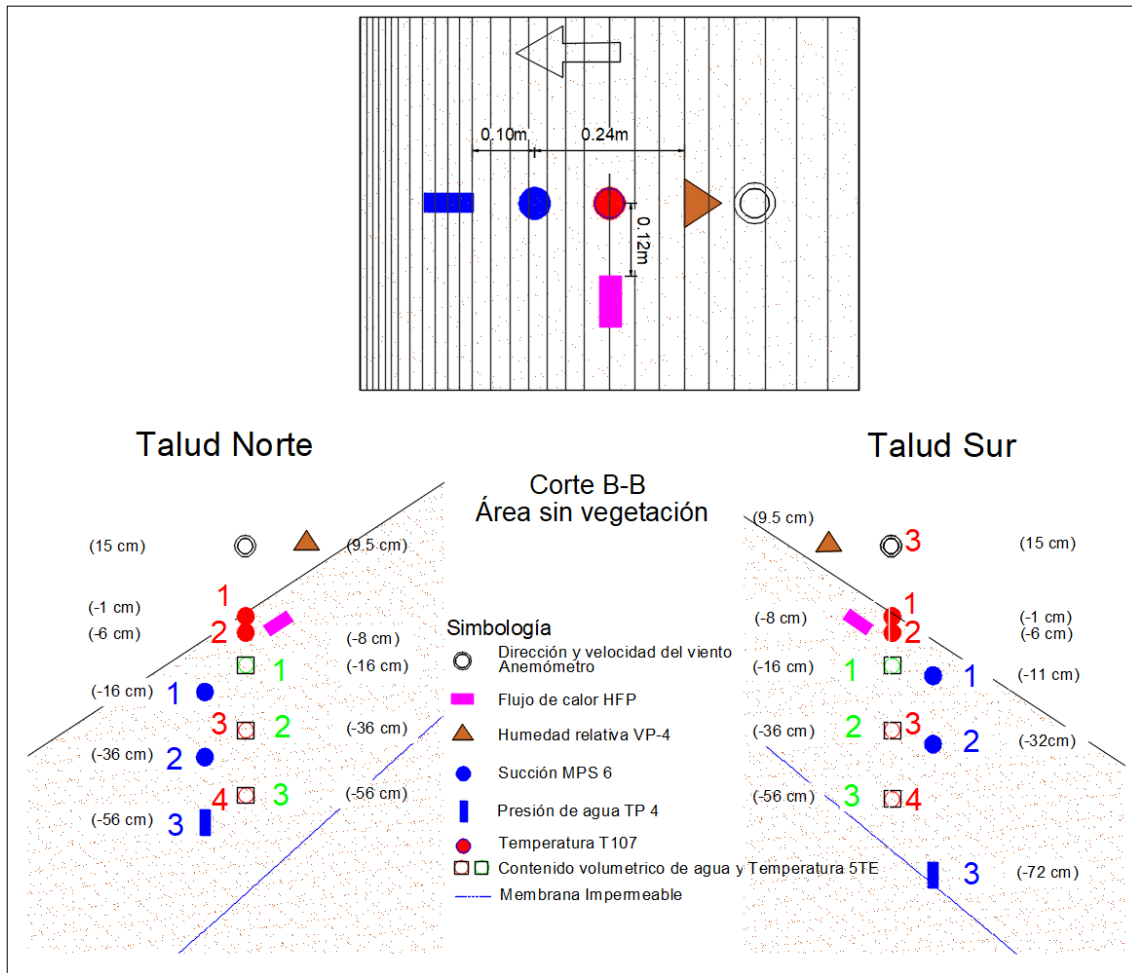


Figura 15. Ubicación de sensores en planta y perfil del área sin vegetación (perfil B-B).

En la Figura 15 se presenta la ubicación de los sensores en profundidad de la cara norte y sur del terraplén experimental en el área no vegetada, los anemómetros P1 y P2 se colocan a 15 cm de la superficie en cada cara del terraplén para medir la velocidad y dirección del viento, los sensores de flujo se calor HFP (1) y (2) están ubicados a -8 cm en cada talud; los sensores T107 y 5TE miden la temperatura a -1 cm, -6 cm, -36 cm, -56 cm en la cara norte y a -1 cm, -6 cm, -36 cm, -57 cm en la cara sur. Los sensores MPS 6 ubicados a -16 cm y -36 cm en la cara norte y a -11 cm y -32 cm en la cara sur del terraplén miden la presión de líquido (succión), además en cada talud se coloca un tensiómetro TP4 a -56 cm y -72 cm para medir presiones de líquido. El contenido volumétrico de agua (VWC) se mide con los sensores 5TE a -16 cm, -36 cm, -56 cm en el talud norte y a -16 cm, -36 cm, -57 cm en la cara del talud sur. En el plano SMuCPHy 02/04 del anexo 5 se detalla la ubicación de cada sensor las mismas que se analiza con la modelización en el programa Code_Bright en el apartado correspondiente a modelación.

En el área con vegetación se instala anemómetros P3 y P4 a 15 cm de la superficie en cada cara del terraplén para medir la velocidad y dirección del viento, los sensores de flujo se calor HFP están ubicados a -8 cm en cada talud; los sensores T107 y 5TE

miden la temperatura a -1 cm, -6 cm, -11 cm, -16 cm, -36 cm, -56 cm en la cara norte y a -1 cm, -6 cm, -36 cm, -43 cm en la cara sur. Los sensores MPS 6 ubicados a -16 cm, -36 cm y -56 cm en la cara norte y a -11 cm, -36 cm, -43 cm en la cara sur del terraplén miden la presión de líquido (succión). En cada talud se coloca un tensiómetro TP4 a -59 cm y -40 cm para medir presiones de líquido. El contenido volumétrico de agua (VWC) se mide con los sensores 5TE a -16 cm, -36 cm, -56 cm en el talud norte y a -16 cm, -36 cm, -43 cm en la cara del talud sur. En el plano SMuCPHy 03/04 del anexo 5 se detalla la ubicación de cada sensor.

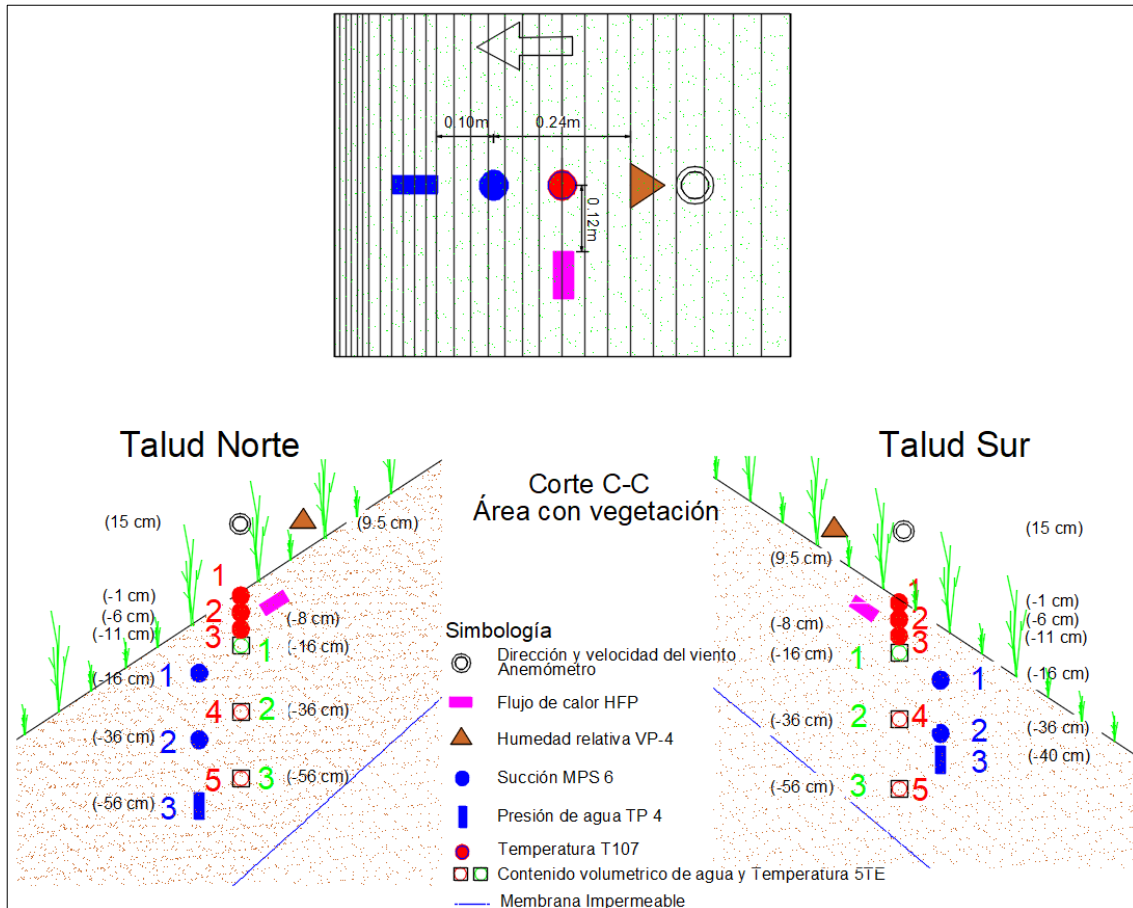


Figura 16. Ubicación de sensores en planta y perfil del área con vegetación (perfil C-C)

Los anemómetros instalados en el terraplén miden velocidades entre 0,5 y 89 m/s (± 1 m/s), dirección del viento de 0 a 360° ($\pm 7^\circ$) (Davis Instrument, n.d.). El sensor HFP01 mide el flujo de calor en W/m^2 dividiendo la salida de HFP01, un voltaje pequeño, por la sensibilidad ($60 \cdot 10^{-6} V/(W/m^2)$) el rango de medida es -2000 a 2000 W/m^2 (Hukseflux Thermal Sensors, n.d.)

La instalación de los sensores en cada perfil del área con vegetación se realiza siguiendo el procedimiento descrito por (Cevallos 2017) como se indica en la Figura 17.



a)

b)

Figura 17. Instalación de los sensores in situ en el área vegetada **a)** perfil de los sensores **b)** sensor de flujo de calor en superficie (20/11/2017).

3.2 Medición de caudales

La duración e intensidad de las precipitaciones conjuntamente con las características del suelo son factores principales para que el agua se infiltre en suelo. En la Figura 18 se presenta los procesos que ocurren después de la precipitación 1) infiltración de agua superficial en el suelo para convertirse en humedad, 2) flujo subsuperficial o flujo no saturado a través del suelo, y 3) flujo subterráneo o flujo saturado a través del suelo o roca (Chow, Maidment, and Mays 1994) De acuerdo al ciclo hidrológico se denomina escorrentía superficial al exceso de precipitación que no retiene la superficie del suelo y que tampoco se infiltra, este flujo (escorrentía superficial) es una capa delgada que fluye a lo largo de la superficie del terreno.

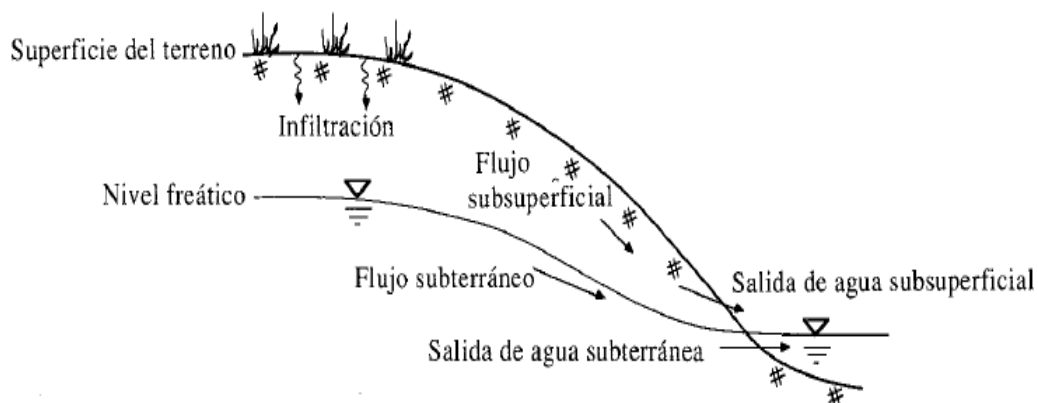


Figura 18. Zonas y procesos de agua subsuperficial (Chow, Maidment, and Mays 1994).

Para realizar la medición del flujo subsuperficial que circula sobre o debajo de la superficie del suelo producido por una precipitación artificial (caudal de entrada) se diseña un sistema de drenaje que permitirá medir el caudal que llega al pie del talud experimental considerando las área con vegetación (corte C-C) y sin vegetación (corte B-B) de la Figura 1. El sistema de drenaje y su dimensionamiento se detalla en los siguientes apartados.

3.2.1 Precipitación

En la estación meteorológica ubicada en el centro del terraplén (METEO) se mide la precipitación a lo largo del tiempo con un pluviómetro (ECRN-100 high-resolution rain gauge, METER) y los resultados se presentarán en el siguiente capítulo (ver Figura 33).

3.2.2 Infiltración

La tasa de infiltración (f) [L/T] es la entrada de agua en el suelo por la interacción suelo-atmósfera. Depende de factores como la superficie del suelo (pendiente), cubierta vegetal; parámetros del suelo como la porosidad, conductividad hidráulica, contenido de humedad; tipo de suelo y/o estratigrafía; temperatura y sus variaciones; grado de compactación y duración e intensidad de las precipitaciones. Al inicio de la precipitación esta tasa es relativamente alta debido al elevado gradiente de potencial y con el tiempo llega ser igual a la permeabilidad saturada (k_{sat}) del suelo como se puede observar en la Figura 21, conforme el suelo se va saturando debido a la intensidad y duración de la lluvia la tasa de infiltración también disminuye.

En 1911 Green y Ampt propusieron un esquema simplificado para superficies horizontales para obtener la tasa de infiltración (f) a partir de la estimación de la conductividad hidráulica k , la porosidad n , la succión efectiva del suelo en el frente de mojado, contenido inicial de humedad θ_i (correspondiente a una succión s_i) del suelo saturado con contenido de humedad θ_s situado por debajo de dicho frente ver Figura 19.

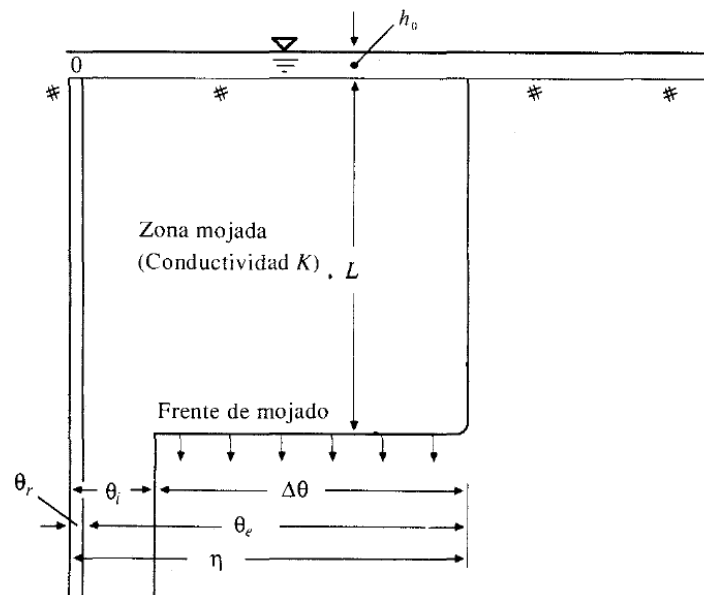


Figura 19. Variables en el modelo de infiltración de Green-Ampt (Chow, Maidment, and Mays 1994).

(Chen and Young 2006) extendieron el método de Green Ampt para superficies inclinadas (ver Figura 20), asumiendo una homogeneidad y propiedades isotrópicas del suelo. La ley de Darcy bajo condiciones de encharcamiento a partir del modelo de Green Amp se escribe:

$$i = i_c = k_e \frac{z_{*f} \cos \gamma + s_f + H}{z_{*f}} \quad (8)$$

Dónde: i_c es la infiltración, i es la tasa de infiltración, k_e es la conductividad hidráulica efectiva, z_{*f} es la profundidad del frente de mojado, s_f es el potencial matricial frontal humectante, H es la altura de agua estancada en la superficie del suelo, $z_f \cos \gamma$ representa la cabeza de gravedad en el frente mojado. Físicamente, se supone que todas las variables permanecen constantes a lo largo de la dirección descendente.

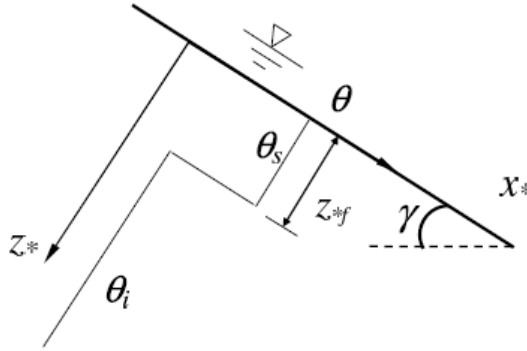


Figura 20. Perfil de contenido de agua para la superficie inclinada de la tierra (Chen and Young 2006).

Para calcular la tasa de infiltración se asume una pequeña altura agua encharcada para el análisis teórico.

La profundidad de infiltración acumulada en la dirección normal, I es igual a:

$$I = (\theta_s - \theta_i) z_{*f} \quad (9)$$

Dónde: θ_s y θ_i contenido inicial de humedad θ_i (correspondiente a una succión s_i) del suelo saturado con contenido de humedad θ_s situado por debajo de dicho frente

Al remplazar la ecuación 9 en la ecuación 8 se obtiene:

$$k_e t \cos \gamma = I - \frac{SM}{\cos \gamma} \ln \left[1 + \frac{I \cos \gamma}{SM} \right] \quad (10)$$

Dónde: $S = s_f + H$, $M = \theta_s - \theta_i$ y

Esta ecuación describe implícitamente la variación de la profundidad de infiltración acumulada con el tiempo.

Con los datos obtenidos de laboratorio k_{sat} y mediciones in situ se elige los siguientes parámetros para estimar la tasa de infiltración en el suelo del terraplén experimental.

Tabla 10. Parámetros del suelo.

Parámetro	Símbolo	Sin vegetación	Und.
Inclinación del talud	θ	33	°
Saturación efectiva	S_e	0,62	-
Porosidad efectiva	θ_e	0,316	-
Succión	S_f	0,16	MPa
Conductividad hidráulica	k_{sat}	$5,90 \cdot 10^{-8}$	m/s
Tiempo de infiltración	t	56	h

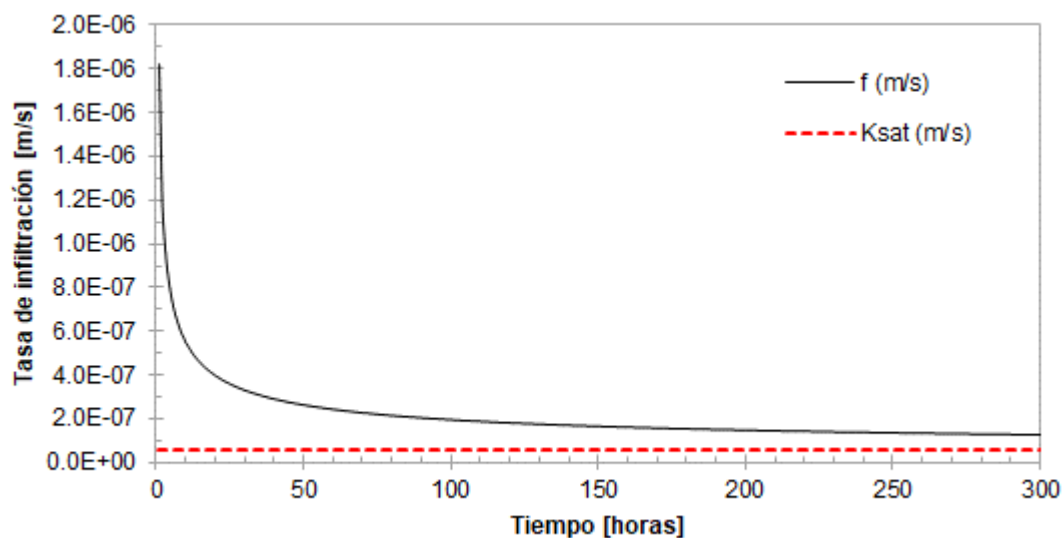


Figura 21. Tasa de infiltración vs tiempo.

Cuando el suelo está saturado el movimiento del agua a través del medio poroso obedece a la ley de Darcy.

$$q = -k \frac{dh}{dz} \quad [L/T] \quad (11)$$

Donde k es la permeabilidad del suelo (m/s), h es el potencial hídrico (m) y z es la coordenada vertical (m).

En el presente TFM la tasa de infiltración se estima a partir de la permeabilidad saturada k_{sat} obtenida de ensayos de laboratorio.

A partir de la densidad seca del suelo igual a $1,55 \text{ g/cm}^3$ y $2,65 \text{ g/cm}^3$ de densidad de las partículas (Cevallos 2017) que corresponde un índice de vacíos de 0,71. De la Figura 13 se obtiene el valor de permeabilidad saturada de $5,90 \times 10^{-8} \text{ m/s}$. Por lo tanto, el caudal de infiltración que se espera es de $5,09 \times 10^{-10} \text{ m/s m}^2$ para el área en estudio.

Para medir in situ el agua producto de la infiltración que llega hasta el pie de talud por la membrana impermeable, se coloca un tubo de PVC de 75 mm partido longitudinalmente (ver Figura 25). Los detalles para la instalación se presentan en el plano SMuCPHy 04/04.

3.2.3 Escorrentía (flujo superficial)

El flujo superficial comienza cuando el agua almacenada en la superficie adquiere un espesor suficiente para sobrepasar las fuerzas de retención y empieza a fluir como una capa delgada a lo largo de la superficie (pendiente) por acción de la gravedad. La escorrentía corresponde a la precipitación que no se detiene en las depresiones del suelo y logra escapar a los fenómenos de evapotranspiración hasta incorporarse a una red de drenaje.

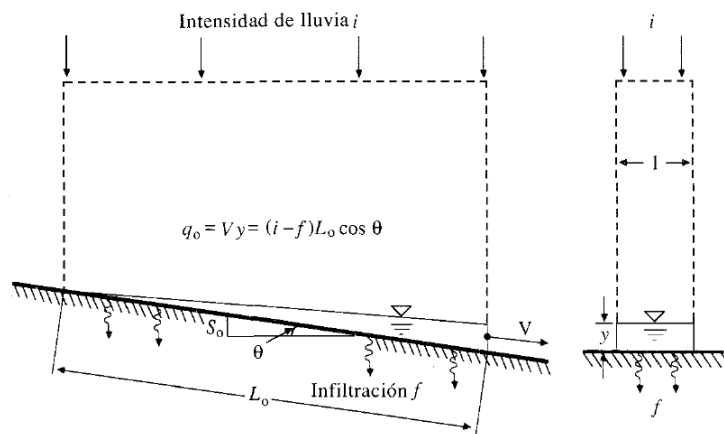


Figura 22. Flujo permanente en un plano uniforme bajo lluvia (Chow, Maidment, and Mays 1994)

En la Figura 22 se presenta el flujo permanente en un plano inclinado con una precipitación i y una tasa de infiltración f . Los flujos son permanentes desde el inicio de la lluvia, el plano tiene una longitud L_o y se inclina un ángulo θ con respecto a la horizontal con una pendiente $S_o = \tan \theta$ (Chow, Maidment, and Mays 1994).

La ecuación de continuidad para un flujo permanente de caudal constante es:

$$\iint_{sc} V \cdot dA = 0 \quad (12)$$

La entrada de volumen de control que se origina por la lluvia es $iL_o \cos \theta$ y la salida $fL_o \cos \theta$ debido a la infiltración más V_y a causa del flujo superficial.

La profundidad y se mide perpendicular al fondo y la velocidad V paralela al fondo, por lo tanto:

$$\iint_{sc} f L_o \cos \theta + v_y - i L_o \cos \theta = 0 \quad (13)$$

El caudal de escorrentía por unidad de ancho q_o está dado por

$$q_o = V_y$$

$$q_o = (i - f) L_o \cos \theta \quad (14)$$

Para predimensionamiento del canal se considera una tormenta de intensidad y duración uniforme igual a 50 mm/h ($1,4 \cdot 10^{-5}$ m/s). En el apartado correspondiente a infiltración se estima un valor de infiltración f correspondiente a 10^{-8} m/s que corresponde a la permeabilidad saturada k_{sat} del medio poroso.

El caudal por unidad de ancho q_o que circula sobre la superficie del terreno se calcula aplicando la ecuación 14 y los datos de la Tabla 11.

Tabla 11. Geometría del talud experimental.

Descripción	Símbolo	Parámetro	Und.
Longitud del talud	L_o	4,09	m
Pendiente	S_o	0,65	-
Inclinación del talud	θ	33	°
Coeficiente de Manning*	n	0,03	-

* Agrópolis (Chow et al., 1994)

El flujo lateral q_o por unidad de ancho es $4,74 \cdot 10^{-5}$ m³/s m (2,85 l/min m).

Flujo en canales

La escorrentía se considera como un flujo lateral hacia un canal de longitud L_c alimentado por un flujo superficial q_o por unidad de ancho y el caudal total que llega al canal es $Q_o = q_o L_c$ como se indica en la Figura 23. La velocidad y profundidad en distintos puntos se calcula a partir de la ecuación de Manning.

$$Q = \frac{1,49}{n} S_o^{1/2} A R^{2/3} \quad (15)$$

Donde A es el área de la sección, R es el radio hidráulico, S_o es la pendiente del canal y n el coeficiente de Manning. Para resolver la ecuación de Manning se aplica el método de Newton Raphson.

$$y_{j+1} = y_j - \frac{1 - Q/Q_j}{\left(\frac{5B_w + 6y_j}{3y_j(B_w + 2y_j)} \right)} \quad [m] \quad (16)$$

Dónde: y es la profundidad del agua y B_w es la solera del canal,

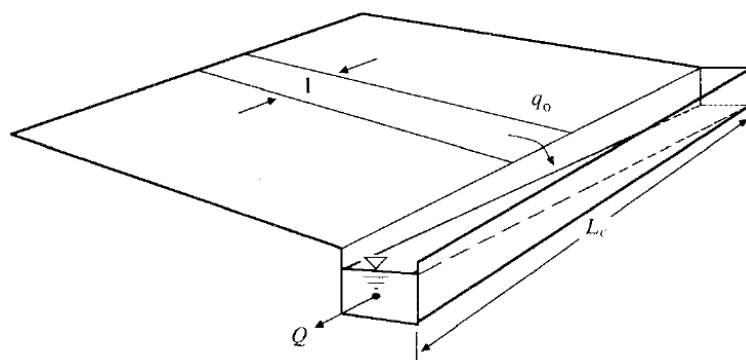


Figura 23. Flujo en canales (Chow, Maidment, and Mays 1994).

El caudal de diseño para realizar el predimensionamiento de la sección del canal es $Q=2,37 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ (14,23 l/min) que obtiene a partir de los datos que se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros de diseño para el canal.

Descripción	Símbolo	Parámetro	Und.
Caudal por unidad de ancho	q_0	$4,74 \cdot 10^{-5}$	$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$
Longitud del canal	L_c	5,0	m
Pendiente del canal	S_0	2,5	%
Coeficiente de Manning	n	0,012	-
Caudal que llega al canal	Q	$2,37 \cdot 10^{-4}$	m^3/s
Base del canal	B_w	0,10	m

3.2.4 Diseño del drenaje

Para medir la escorrentía (flujo superficial) se diseña un sistema de drenaje capaz de captar el agua que se escurre por la superficie del terreno mediante un canal al final de la pendiente.

A partir de las dimensiones de diseño se elige una sección de canal de hormigón polímero tipo ULMA, modelo SELF de ancho exterior 130 mm, ancho interior 100 mm y altura exterior 115 mm para recoger el agua superficial en módulos de 1 m colocados al pie del talud con pendiente del 2,5%. En Figura 24 se presenta la sección y rejilla del canal.

De las ecuaciones (15), (16) y la Tabla 12 se obtiene el caudal y la profundidad del flujo cada metro de distancia, se ha optado por utilizar el mismo canal para los dos tipos de áreas (sin vegetación y con vegetación) debido a que los datos presentados son similares para el diseño.

Tabla 13. Profundidad del agua a lo largo del canal.

Longitud	L (m)	0	1	2	3	4	5
Caudal	Q (m ³ /s)	0	4,74 10 ⁻⁵	9,49 10 ⁻⁵	1,42 10 ⁻⁴	1,90 10 ⁻⁴	2,37 10 ⁻⁴
Profundidad	y (m)		1,72 10 ⁻³	2,63 10 ⁻³	3,37 10 ⁻³	4,02 10 ⁻³	4,62 10 ⁻³
Velocidad	V (m/s)	0	0,28	0,36	0,42	0,47	0,51
Caudal	Q (l/min)	0	2,85	5,69	8,54	11,39	14,23



Figura 24. Sección y rejilla del canal (MAUSA, n.d.).

Además, con la construcción del canal se prevé medir la cantidad de sedimentos que pueda arrastrar el caudal sobre la superficie en cada talud por en ende se coloca una barandilla de madera en la parte lateral del canal y sobre la rejilla un geotextil que permita recoger este material para luego ser pesado en el laboratorio. En la Figura 14 se presenta en planta la ubicación de los canales y en la Figura 25 se presenta el detalle para recoger el material por sedimentación.

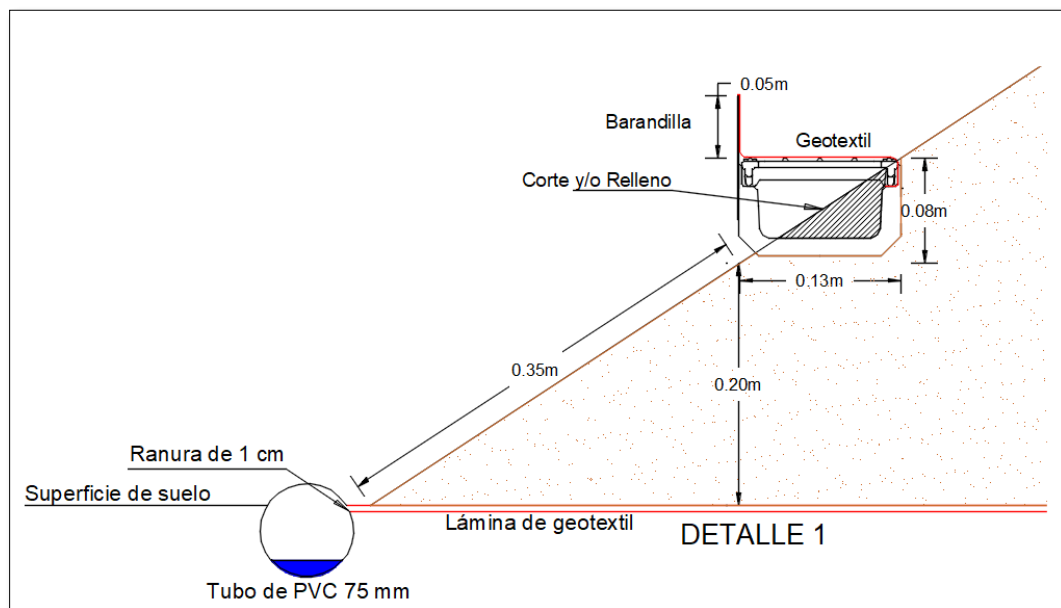


Figura 25. Detalle de instalación del canal para medir la escorrentía y la tubería de PVC para recoger el agua que se infiltre en el talud.

3.3 Construcción del drenaje

A partir del diseño descrito en el apartado anterior se replantea el eje del canal junto a la cara del talud evitando cortes y/o rellenos excesivos. La excavación, nivelación y colocación de los distintos módulos se realiza a mano.

Para evitar el taponamiento del canal debido al arrastre de sedimentos se coloca geotextil al contorno del canal y una protección lateral de madera que permite recoger estos materiales sedimentados como se indica la Figura 26, los detalles y medidas se presenta en el plano el plano SMuCPHy 04/04 del anexo 5.



a)



b)



c)



d)

Figura 26. Construcción del canal (16/03/2018) **a)** Excavación y colocación de canales, **b)** Sellado de juntas **c)** Colocación de rejillas **d)** colocación de geotextil.

De acuerdo al diseño el canal transportará caudales del orden de 0,24 l/s (14,4 l/min) que es el caudal que se recoge en los primeros 5 metros desde el eje del terraplén tanto para el área vegetada y no vegetada, al final del canal se coloca un vertedero triangular de sección conocida que permita medir el caudal que circula.

Hoy en día con el avance de la tecnología existen distintas plataformas de código abierto basados en hardware y software libre como es Arduino (www.arduino.cc). Esta placa utiliza diversos microcontroladores y microprocesadores que permiten conectar placas de expansión (shields) a través de la disposición de los puertos de entrada y salida presentes en la placa. Las shields complementan la funcionalidad del modelo de placa empleada, agregando circuitería, sensores y módulos de comunicación externos a la placa original. Se ha desarrollado una aplicación de la placa de Arduino en el presente TFM con la finalidad de implementar un sensor que mida el caudal de agua en el vertedero ubicado en el canal que intercepta la corriente de agua con superficie libre y que causa una elevación del nivel del fluido aguas arriba donde se mide el caudal.

Para medir la altura de agua sobre el vertedero se utiliza el sensor de ultrasonido HC-SR04 que envía una señal ultrasónica inaudible y entrega el tiempo que tarda en ir y volver hasta el obstáculo más cercano, en este caso, cuando exista caudal en el canal rebota la señal en la lámina de agua. Con el tiempo obtenido y la velocidad del sonido igual a 343 m/s se obtiene la distancia a la lámina de agua y restando la distancia al vacío se obtiene la altura de agua que pasa por el vertedero. Este sensor está conformado por dos cilindros uno a lado del otro, el uno emite la señal y el otro recibe. Para registro de datos se instala un reloj de tiempo real (RTC DS3231) que es un dispositivo electrónico que permite obtener datos del tiempo (Fecha, hora, minutos y segundos). La tarjeta SD de 16 GB se utiliza para almacenar las lecturas realizadas, todos estos dispositivos electrónicos van conectados a la placa Arduino de acuerdo a la Figura 27. Para proteger la placa de Arduino se utiliza una caja de acero IP 55 y se construye una caja en metacrilato para proteger el sensor de ultrasonido. Entre la placa y fuente de alimentación de energía se coloca un transformador SD-15A-05 de corriente continua que permite ir de una tensión continua (12 V) a otra tensión continua, en este caso (5 V) a 3A.

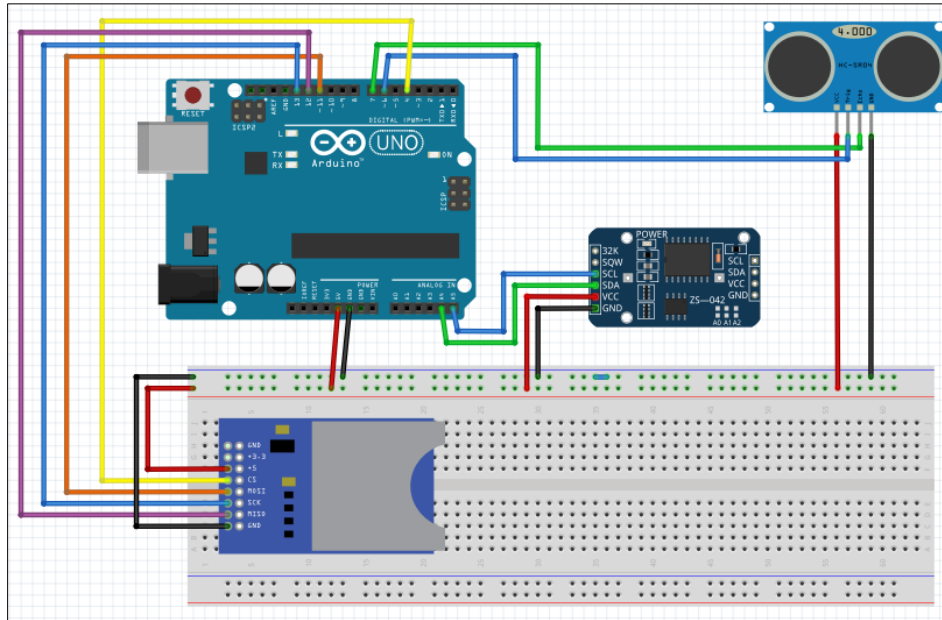


Figura 27. Esquema del circuito.

Para determinar el caudal se diseña un vertedero triangular de pared delgada como se indica en la figura Figura 28 que intercepte el agua que se recoge en el canal elevando así el nivel del fluido que permita medir la altura de la superficie libre aguas arriba.

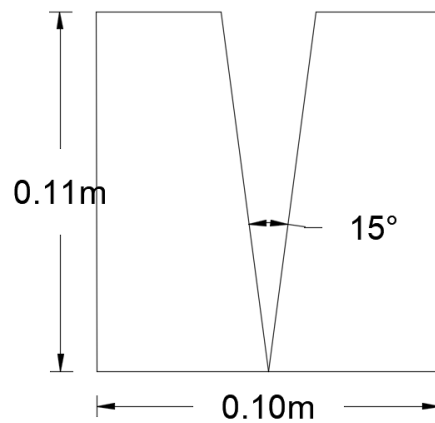


Figura 28. Geometría del vertedero.

El caudal que circula por el canal depende de la altura y la geometría del vertedero que se calcula a partir de la siguiente expresión.

$$Q_t = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{5/2} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (17)$$

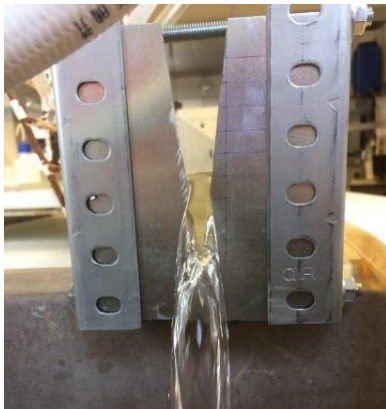
Donde Q_t es el caudal teórico, g es la gravedad, θ es el ángulo (15°), h es la altura y C_d es coeficiente de descarga que se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$C_d = \frac{Q_{ajustado}}{Q_t} \quad (18)$$

Finalmente, el caudal real se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{ajustado} = \alpha h^\beta \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (19)$$

Donde α y β son parámetros a determinar en cada caso. La calibración del vertedero se realiza en el laboratorio donde se instalaron dos canales (SELF) con la pendiente del diseño (2,5%) y el vertedero de sección conocida al inicio de la pendiente como se indica en la Figura 29. Para medir la altura de agua se marca cada centímetro en la cara del vertedero y se coloca un sensor de ultrasonido aguas arriba del vertedero muy cerca de la sección del vertedero. Se deja circular agua en el canal a distintas alturas y en un tiempo determinado se recoge el agua en una bandeja que se pesa para conocer su volumen a partir de la densidad del agua (1000 kg/m^3). Del volumen y el tiempo se obtiene el caudal medido $Q_{medido} [\text{m}^3/\text{s}]$ que se presenta en la Figura 30.



a)



b)

Figura 29. Calibración del vertedero en el laboratorio.

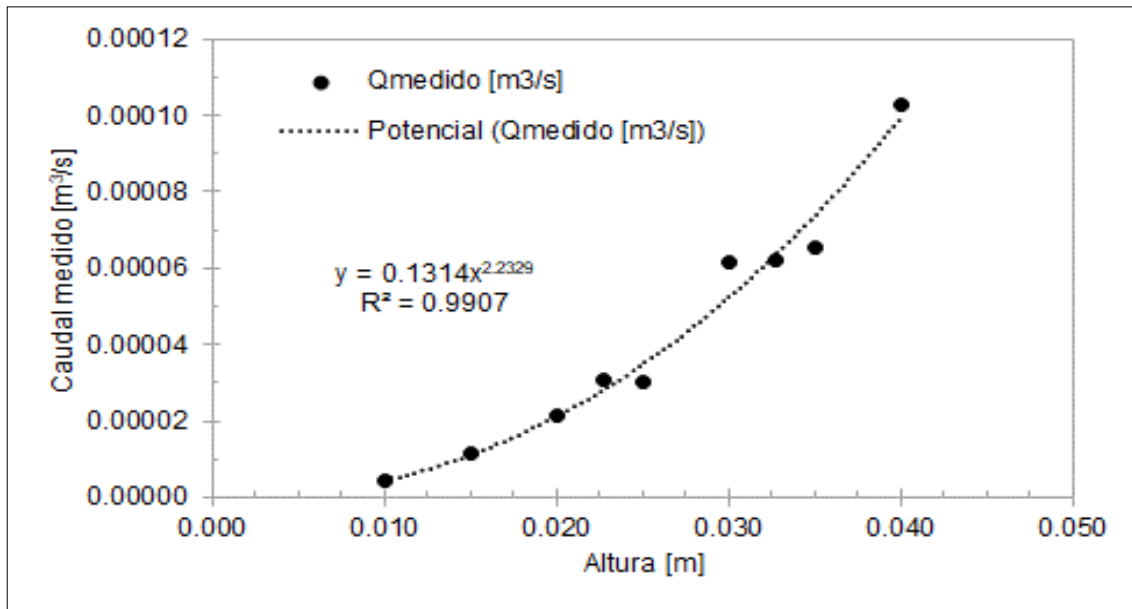


Figura 30. Caudales medidos en laboratorio.

Del caudal medido se obtiene la ecuación de calibración aplicando una regresión de tipo potencial donde $\alpha=0,1314$, $\beta=2.2329$ que permite calcular el caudal ajustado que atraviesa el vertedero y coeficiente de descarga C_d aplicando la ecuación 18

$$Q_{ajustado} = 0,1314h^{2,2329} \quad [m^3.s^{-1}] \quad (20)$$

En la Tabla 14 se presenta las distintas mediciones de caudal realizadas en laboratorio y los distintos cálculos aplicando las ecuaciones indicadas anteriormente.

Tabla 14. Caudales obtenidos experimentalmente.

Altura de agua [m]	Qmedido [m3/s]	Qajustado [m3/s] (ec. 20)	Qteórico[m3/s] (ec.17)	Cd [-] (ec. 18)
0.010	0.0000043	0.000004	0.000003	1.445
0.015	0.0000117	0.000011	0.000009	1.297
0.020	0.0000212	0.000021	0.000018	1.201
0.025	0.0000301	0.000035	0.000031	1.132
0.030	0.0000617	0.000052	0.000048	1.078
0.035	0.0000656	0.000074	0.000071	1.034
0.040	0.0001028	0.000099	0.000100	0.998
0.023	0.0000305	0.000028	0.000024	1.160
0.033	0.0000620	0.000064	0.000061	1.053
0.051	0.0001919	0.000170	0.000182	0.936

La precisión del sensor de distancia HC-SR04 es de 3 mm y su rango de medida es 0,02 a 4 m (www.Electronics.com). Si aplicamos este error de altura medida en la ecuación 20 el error en caudal medido es $3,05 \cdot 10^{-7} m^3/s$ (0,018 l/min). La calibración se realizó

mediante un ajuste potencial por lo tanto el error no es lineal, así a mayor altura el error aumenta.

Los datos de altura de agua medidos por el sensor de distancia HC-SR04 y el tiempo a partir del sensor RTS DS3231 en intervalos de 5 min se almacenan en un archivo denominado *PerfilNorte.txt* en la tarjeta SD como se indica en la Figura 31.

PerfilNorte: Bloc de notas

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
Fecha	Hora	Altura	de	agua
10/4/2018	10:40:00	0.0	cm	
10/4/2018	10:45:00	1.0	cm	
10/4/2018	10:50:00	1.2	cm	
10/4/2018	10:55:00	1.4	cm	
10/4/2018	11:00:00	1.2	cm	
10/4/2018	11:05:00	1.9	cm	
10/4/2018	11:10:00	1.2	cm	

Figura 31. Formato de salida de datos (*PerfilNorte.txt*).

3.4 Registro de datos

3.4.1 Evolución en el tiempo de las lecturas

Variables ambientales

De la estación meteorológica Agrópolis ubicada en la parte central del terraplén experimental y los sensores de cada talud se obtiene datos de las variables ambientales como temperatura ambiente, precipitación, humedad relativa y velocidad del viento. Estas variables han sido comparadas con los datos de la estación meteorológica Viladecans ubicada a 1,3 km del terraplén. Para analizar el acoplamiento Termo-Hidráulico (TH) del presente TFM, se han tomado todos los valores de las variables ambientales de la estación Viladecans que corresponde al periodo de un año a partir del 11 de enero del 2017 fecha en la cual se construye el terraplén.

En la Figura 32, Figura 33 y Figura 34 se presenta la temperatura ambiente, la precipitación y la humedad relativa registrada por los sensores descritos en el apartado 3.1 del área sin vegetación. Los valores registrados en la estación Agrópolis son valores comparables con los datos que registra la estación meteorológica de Viladecans ambas medidas representan los ciclos estacionales del año. Las variaciones diarias en las medidas de las temperaturas en Agrópolis son algo mayores que las registradas en Viladecans, probablemente debido a la cercanía de los termómetros a la superficie del terreno.

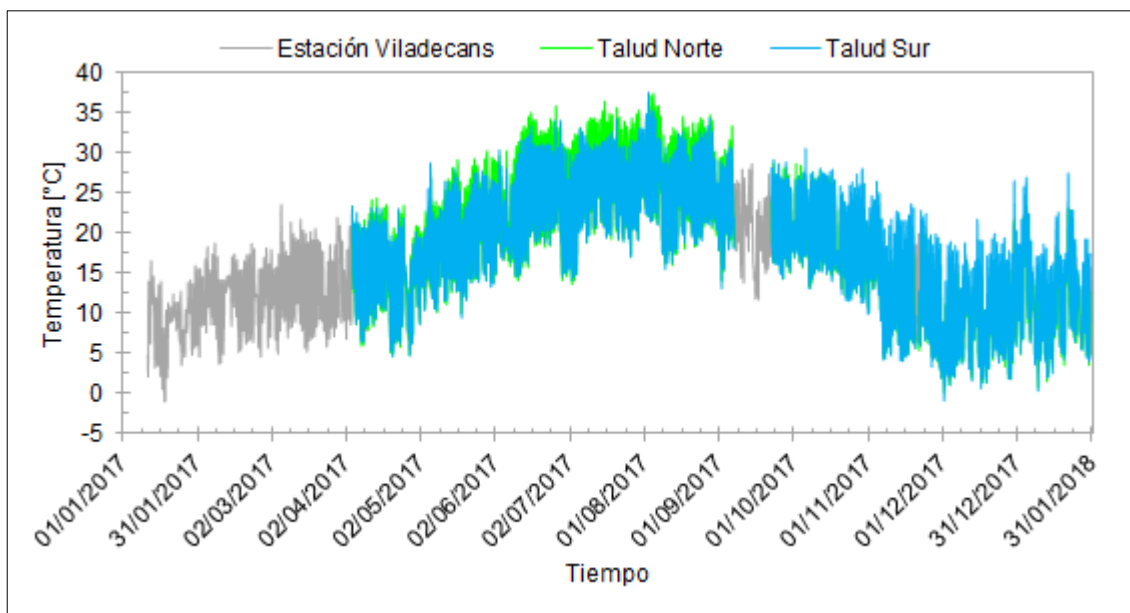


Figura 32. Temperatura del medio ambiente en el tiempo.

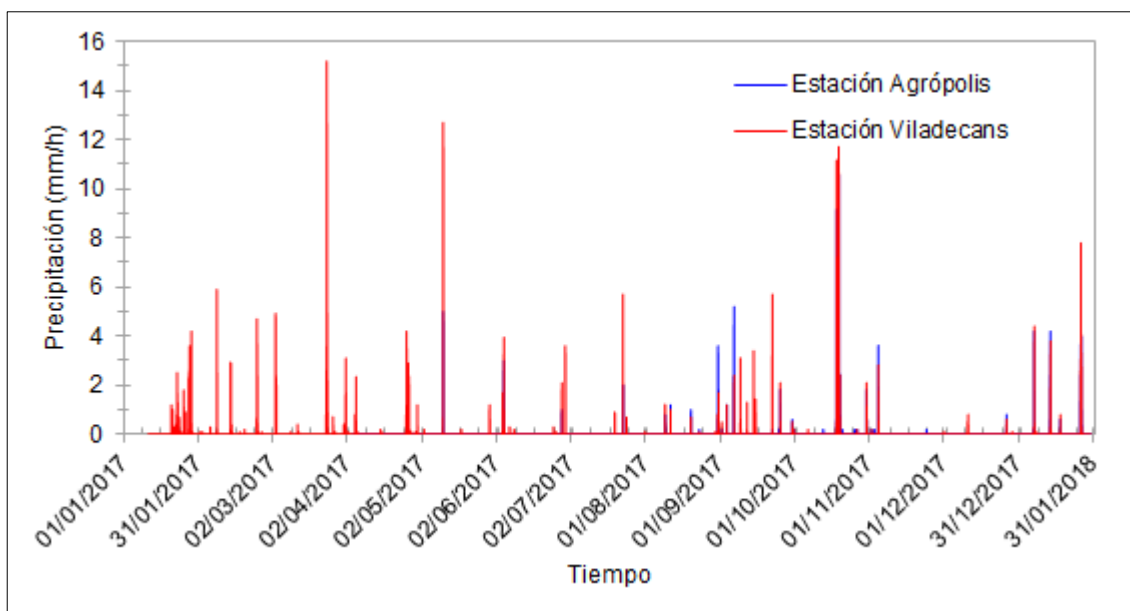


Figura 33. Precipitación en el tiempo.

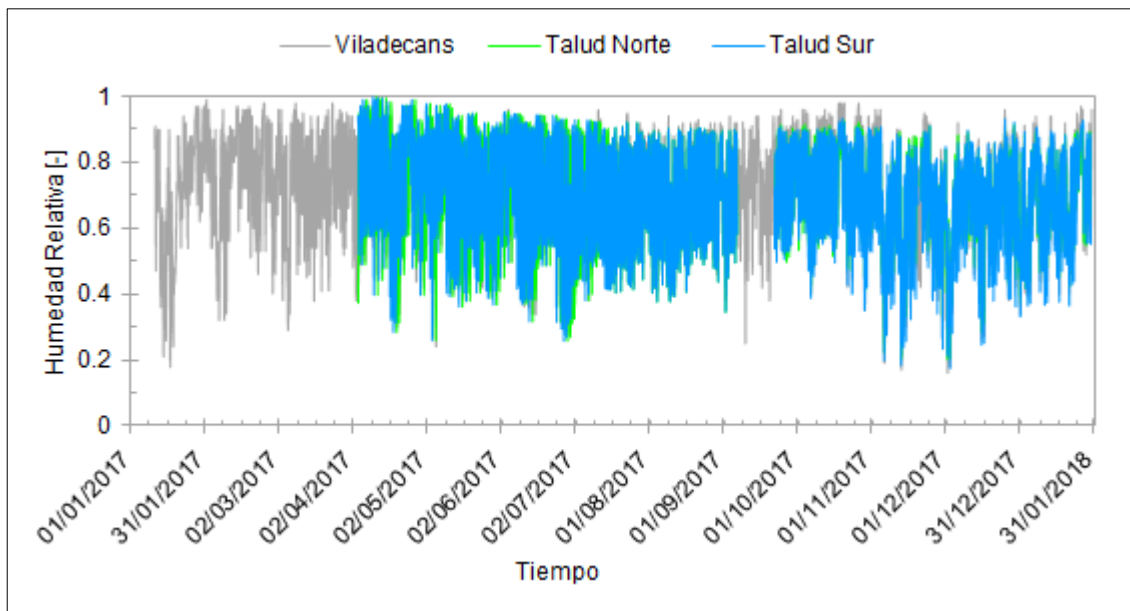
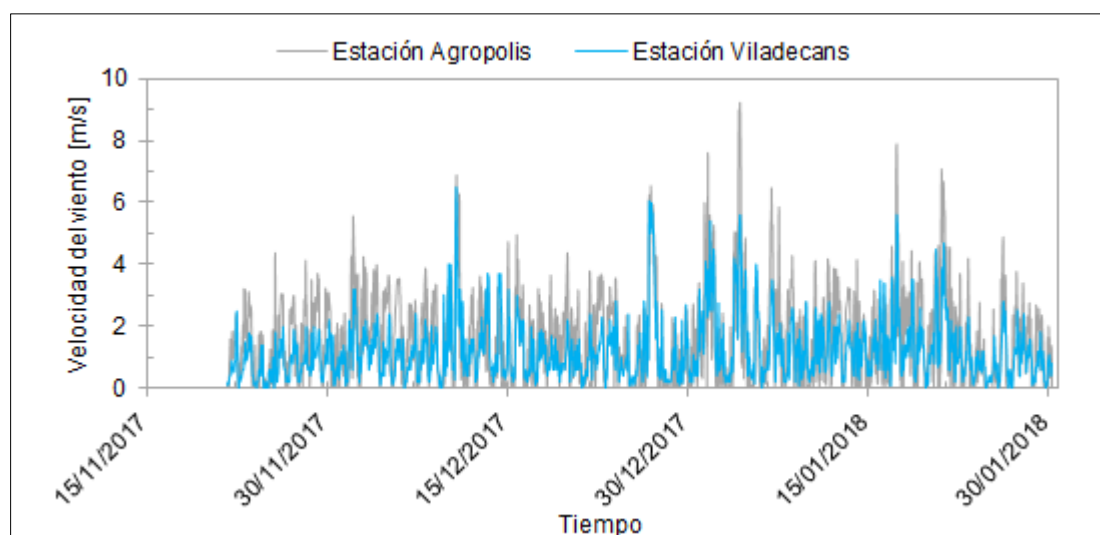


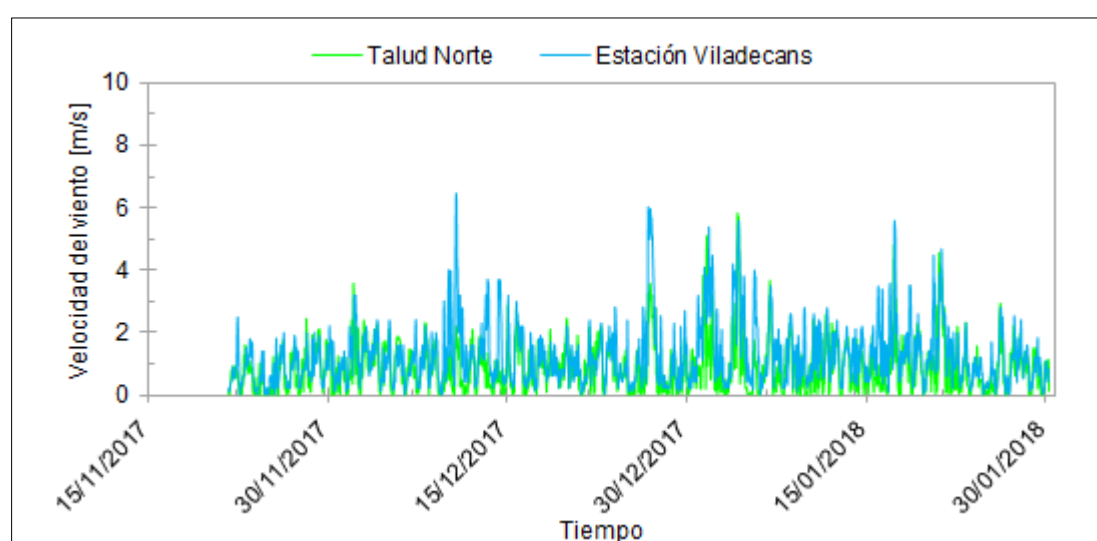
Figura 34. Variación de la humedad relativa con el tiempo.

La velocidad del viento horaria que registra los anemómetros instalados a partir del 21 de noviembre del 2017 en cada talud a 8 cm y 2 m sobre la superficie en la estación Agrópolis (centro del terraplén) se presenta en la Figura 35 comparados con los datos obtenidos de la estación meteorológica Viladecans registrados a 2 m de la superficie del suelo. La velocidad máxima del viento es 9,2 m/s registrado en la estación Agrópolis (ver Figura 35 a) superior a la estación Viladecans. En la Figura 35 b) la velocidad máxima es 6,5 m/s que corresponde a la estación Viladecans que se compara con la velocidad registrada en el talud norte y sur. La velocidad máxima es superior en ambos taludes especialmente en el talud sur (ver Figura 35 c).

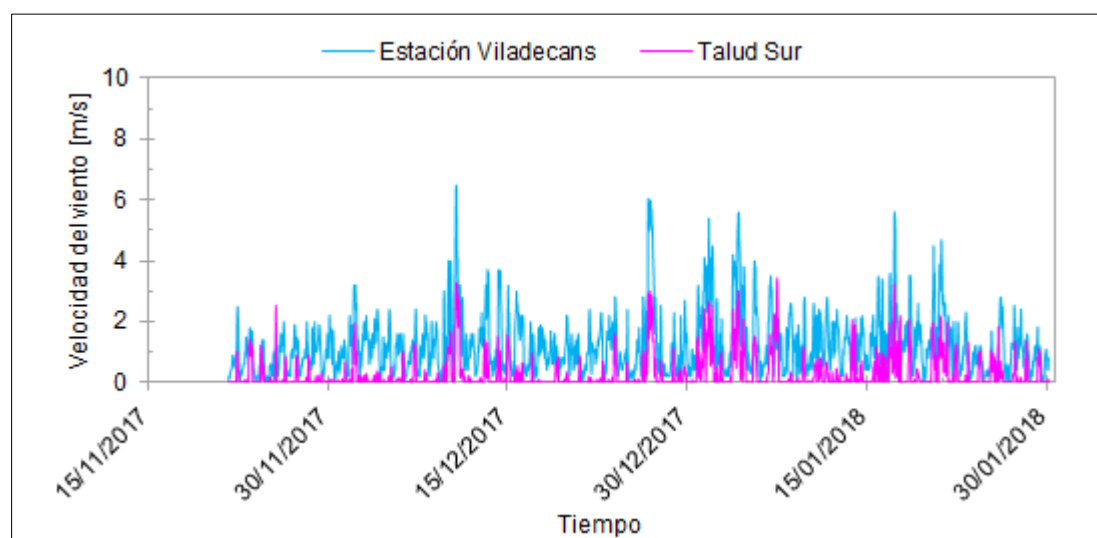
Finalmente se realiza la comparación entre la velocidad del talud norte y sur presentada en la Figura 35 d) donde se observa que el talud norte presenta valores más altos de velocidad del viento. La razón que justifica esta diferencia es que el viento predominante llega directamente a la cara norte y cambia de dirección al sobrepasar el terraplén por la parte superior razón por la cual el anemómetro de la estación de Agrópolis (centro del terraplén) registra valores muy similares al talud norte y en la cara sur se registre valores menores de velocidad de viento. El registro de esta variable ambiental es muy importante en el proceso de evaporación.



a)



b)



c)

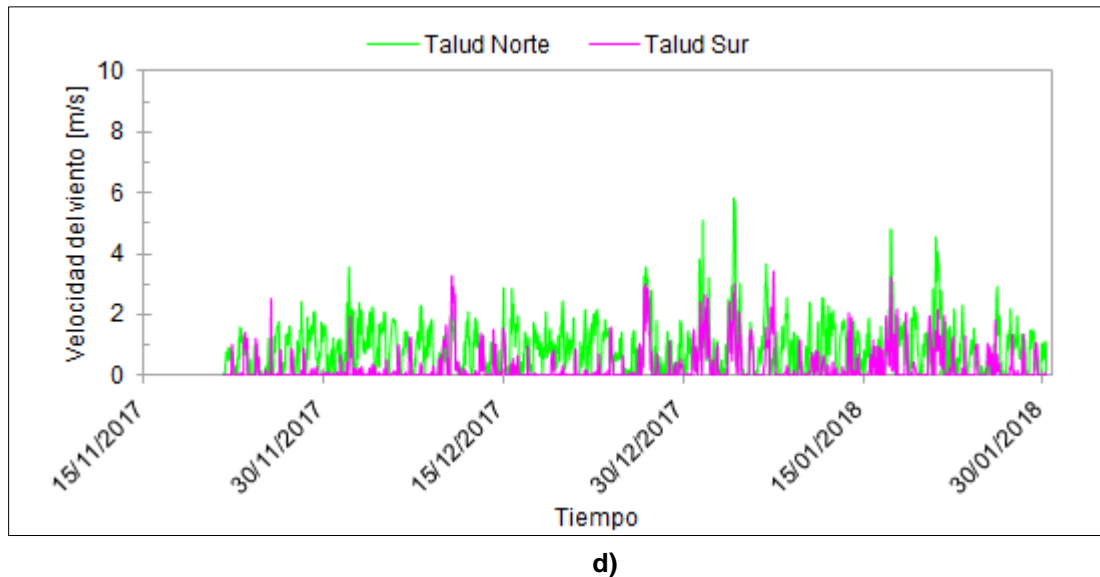


Figura 35. Comparación de la velocidad del viento de la estación meteorológica Viladecans con **a)** Estación Agrópolis, **b)** Talud norte, **c)** Talud sur y comparación entre velocidades del Talud norte y Talud sur **d)**.

Por la falta de datos registrados de velocidad del viento en el talud norte y sur se utiliza los datos de la estación meteorológica Viladecans para realizar la modelación en cada talud. A partir de la fecha cuando se instaló los sensores (21 de noviembre de 2017) se compara los datos presentados en la Figura 35 a) para el talud norte que corresponde con las velocidades registradas en Viladecans a diferencia del talud sur Figura 35 b) que es menor a la que se utiliza en el modelo. En la interacción suelo-atmósfera la velocidad del viento es muy importante debido a que controla el proceso de evaporación que se relaciona con el grado de saturación y este a su vez con la presión de líquido (succión).

En la Figura 36 se presenta la cantidad de energía transferida a través de la superficie del talud norte y sur registrada a 8 cm de profundidad. Los valores positivos corresponden a flujo hacia el interior del terraplén y los negativos hacia el exterior. Puede observarse un flujo de mayor intensidad en la cara sur del terraplén.

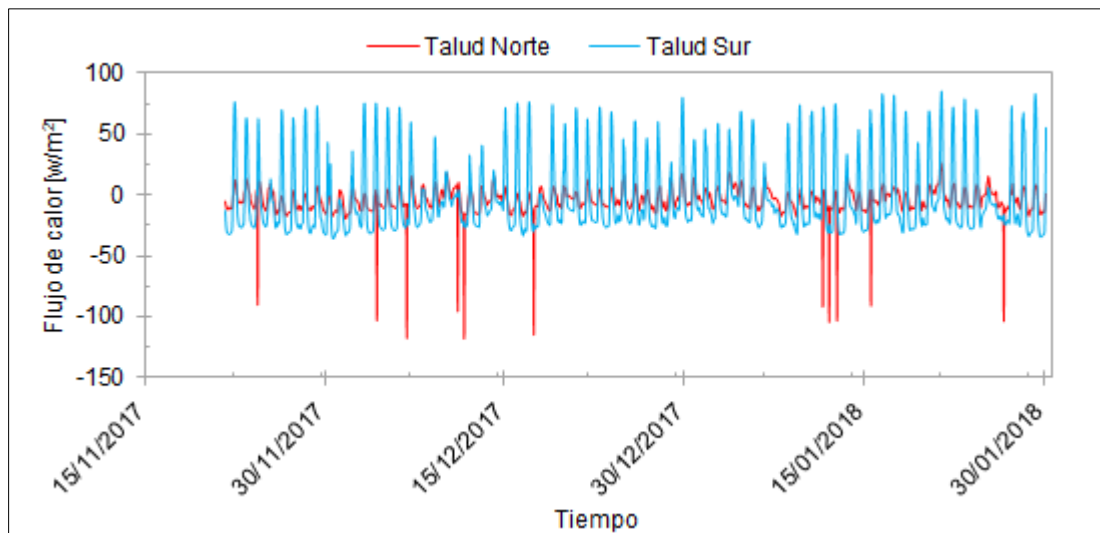


Figura 36. Variación de flujo de calor con el tiempo.

Las siguientes figuras son el resultado del monitoreo a lo largo del tiempo por los sensores instalados de acuerdo a la Figura 15 descrita en el apartado 3.1 correspondiente al área no vegetada. A partir de estos datos medidos se calibra el modelo Termo-Hidráulico (TH) con la finalidad de comprender los distintos fenómenos que ocurren en la interacción suelo – atmósfera.

Temperatura

Bajo las mismas condiciones ambientales la temperatura del suelo registrada por los sensores en el perfil del talud norte y sur es distinta como se indica en la Figura 37 y Figura 38. La temperatura superficial a -1 cm registrada por el sensor T107 en cada talud permite visualizar la diferencia y oscilaciones de temperatura que existe. Son 15°C de diferencia entre las temperaturas máximas registradas cada 5 minutos y 1,7 °C entre temperaturas mínimas. Si analizamos a mayor profundidad a - 36 cm los datos registrados por el sensor 5TE la diferencia máxima es 2,2° C y la mínima de 4,5 °C a esta profundidad en ambos taludes las oscilaciones son menores, pero sigue siendo la temperatura del talud sur más alta y esta tendencia se mantiene en cada punto. Las oscilaciones diarias prácticamente desaparecen a -36 cm de profundidad. A -56 cm de profundidad la variación anual entre verano e invierno es de unos 17° C en el talud norte y de unos 14° C en el talud sur

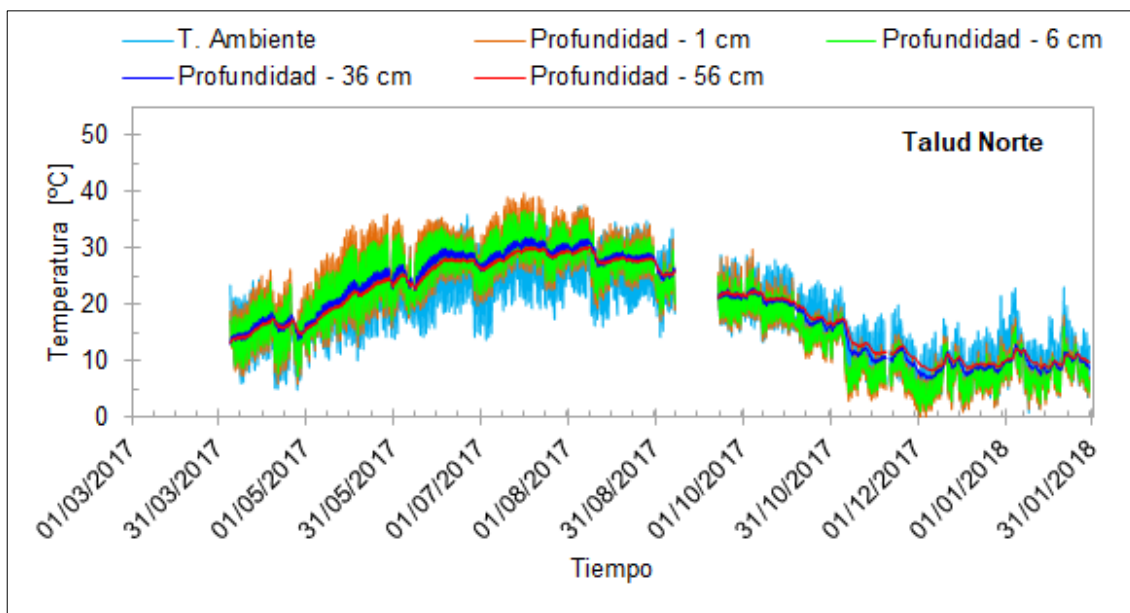


Figura 37. Variación de la temperatura en el tiempo – talud norte.

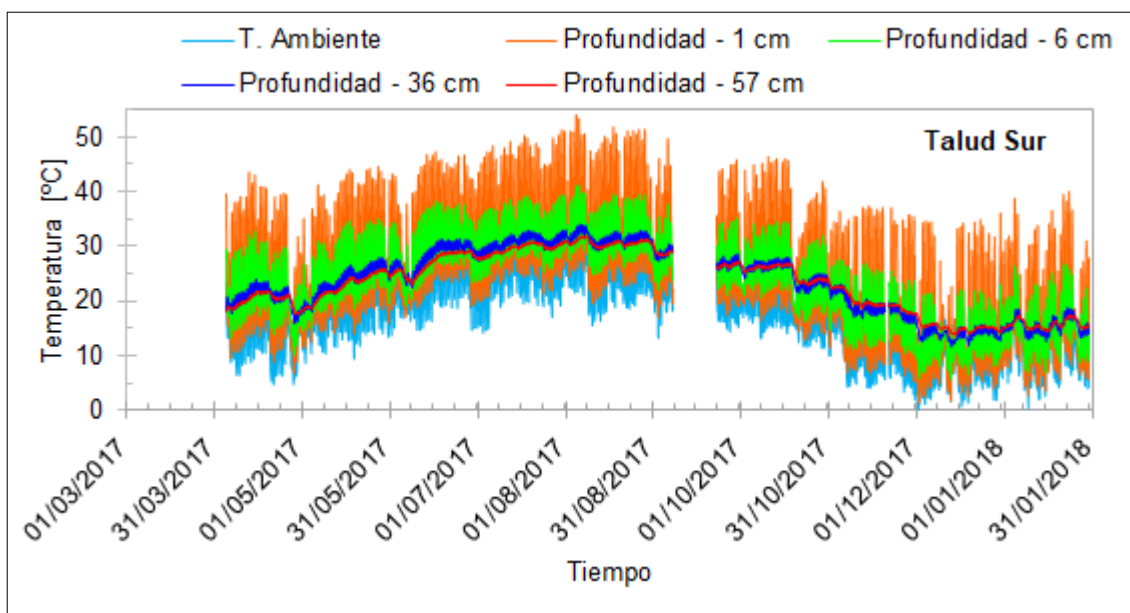


Figura 38. Variación de la temperatura en el tiempo – talud sur.

Contenido volumétrico de agua

La evolución del contenido volumétrico de agua (VWC) se presenta en la Figura 39 y Figura 40 que corresponden a datos que registran los sensores 5TE en cada talud y la precipitación registrada en la estación meteorológica Viladecans. De las gráficas se puede decir que el talud norte durante un año ha llegado a VWC más altos (mayor humedad) que el talud sur lo que podría ligarse con la diferencia de temperatura del suelo que se registra en ambas caras. Debido a las altas temperaturas del suelo registradas en el talud sur el suelo pierde humedad y por ende se mantiene su VWC menor al talud norte. En verano el talud norte empieza a perder humedad desde la

superficie, como era de esperar, pero en el talud sur el proceso de secado evoluciona, de forma que los valores de contenido volumétrico de agua (VWC) menores se registran a -36 cm y la capa superficial retiene cierta cantidad de agua inferior, aunque inferior a la del punto ubicado a -57 cm. En periodos correspondientes a precipitaciones el terraplén experimenta procesos de humectación (mojado) que se presenta en las gráficas como un cambio brusco (picos) en la continuidad de los datos registrados especialmente cuando el suelo tiene un VWC bajo. Los valores máximos del VWC corresponden a la porosidad del suelo, que como puede observarse varía de un punto de medida a otro. El modelo numérico planteado en el presente TFM permite comprender estos distintos comportamientos que se analizarán en los apartados correspondientes a los resultados del modelo.

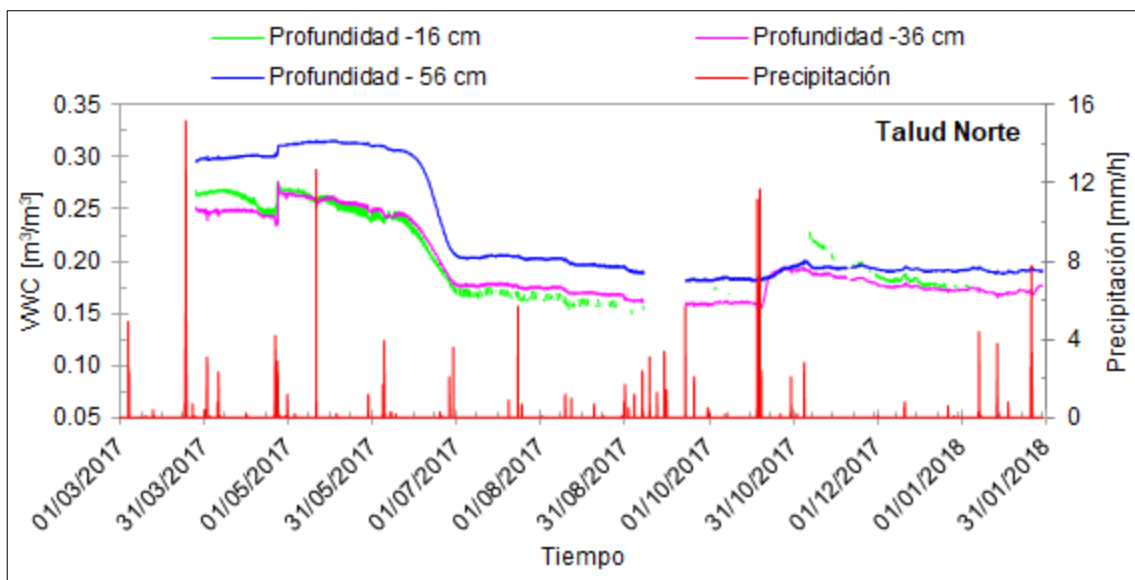


Figura 39. Variación del contenido volumétrico en el tiempo – talud norte.

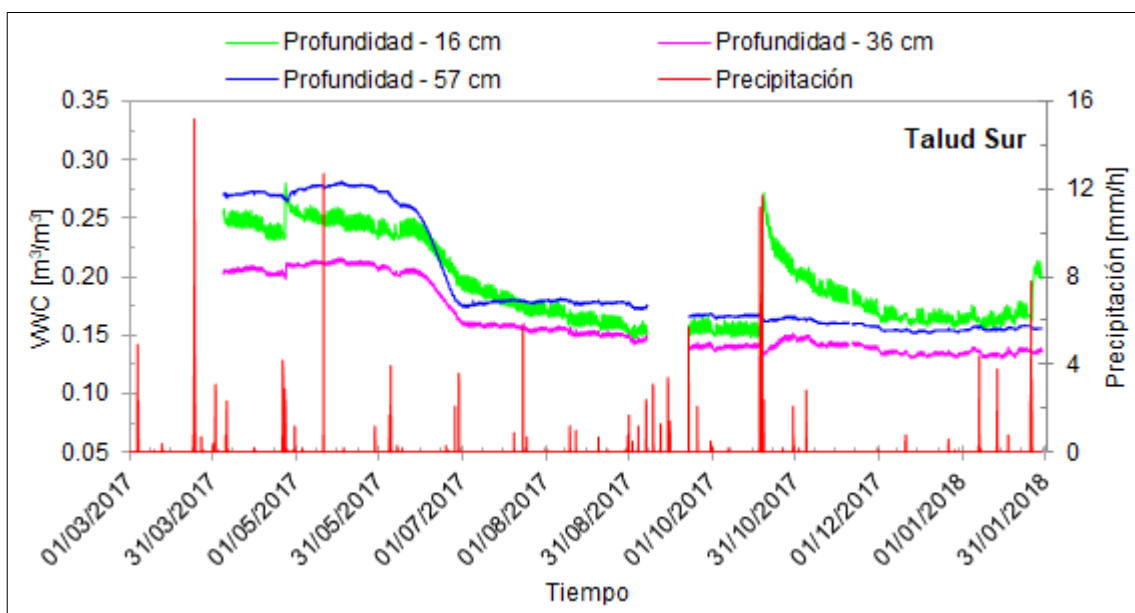


Figura 40. Variación del contenido volumétrico en el tiempo – talud sur.

Succión

La succión en ambos taludes disminuye con la profundidad como se presenta en las Figura 41 y Figura 42. En el talud norte se presenta valores más elevados de succión con mayor oscilación que va disminuyendo con la profundidad. Esta oscilación de succión se corresponde con los datos registrados de VWC de la Figura 39, lo que equivale a decir que a mayor profundidad, menor succión y mayor VWC. En el talud sur no sucede lo mismo, el punto a profundidad de 36 cm con un VWC menor al de las demás profundidades debería tener la succión más alta, pero la succión disminuye con la profundidad y las oscilaciones son menores (como ocurre en el talud norte). La respuesta de los sensores frente a intensas precipitaciones es la esperada con cambios significativos y/o leves que se van retrasando a medida que aumenta la profundidad.

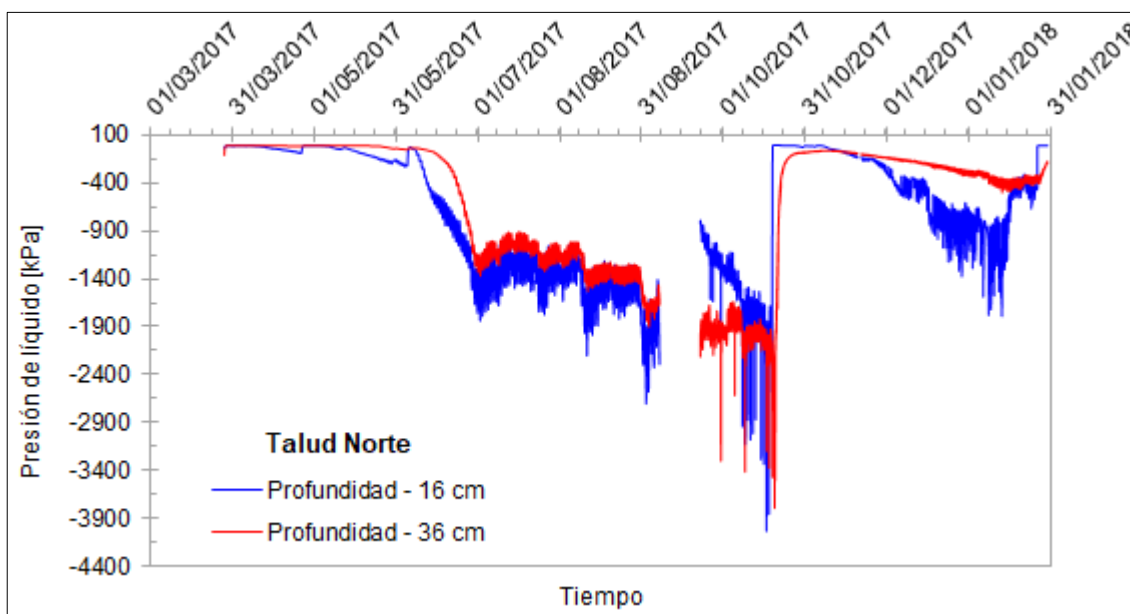


Figura 41. Variación de la succión en el tiempo – talud norte.

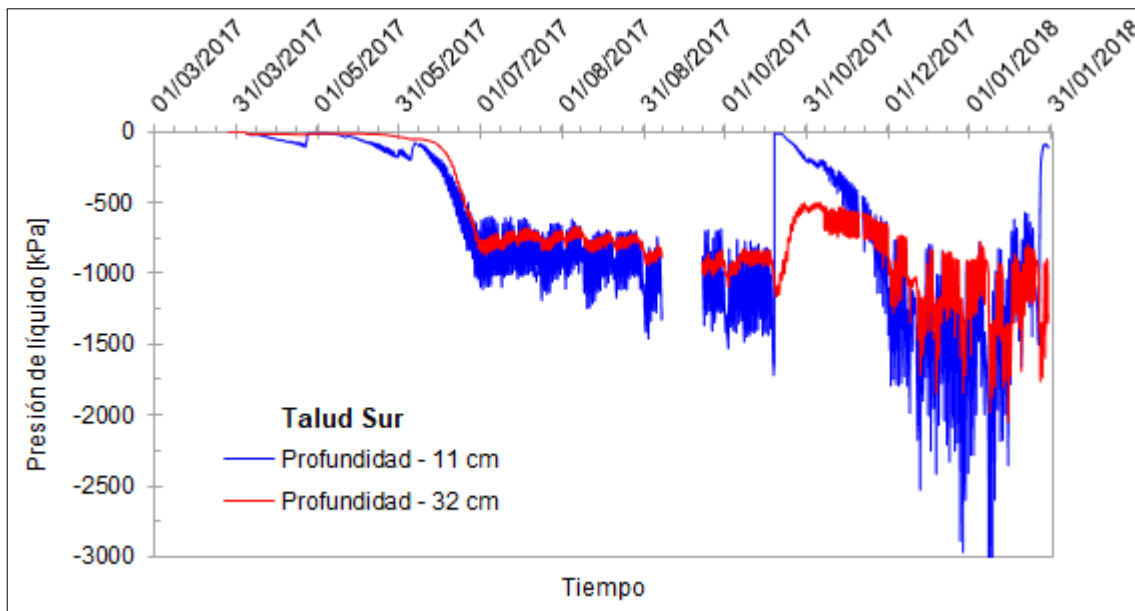
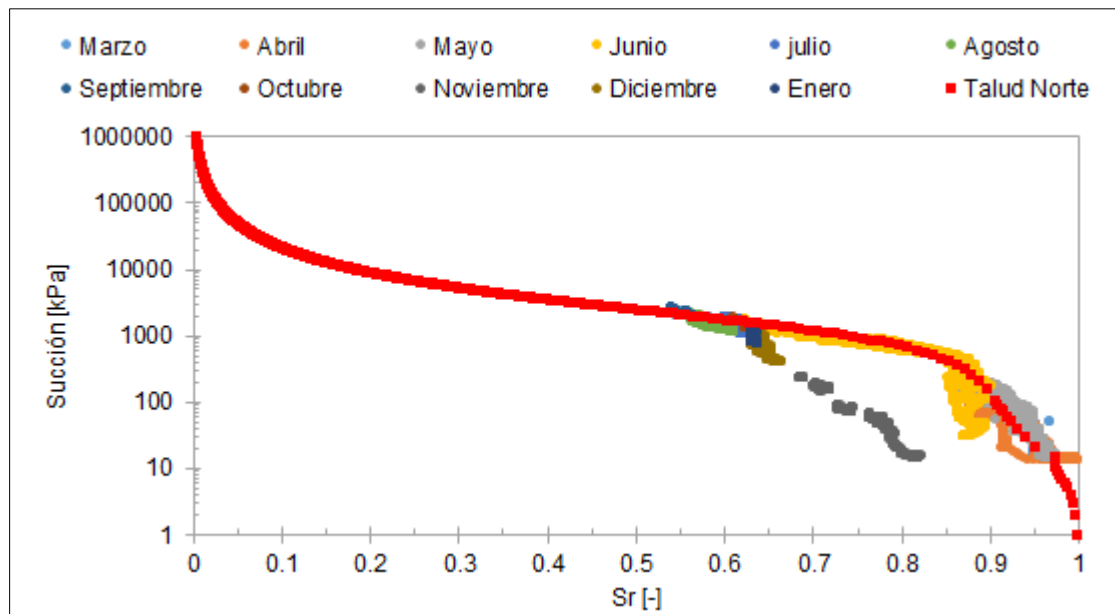


Figura 42. Variación de la succión en el tiempo – talud sur.

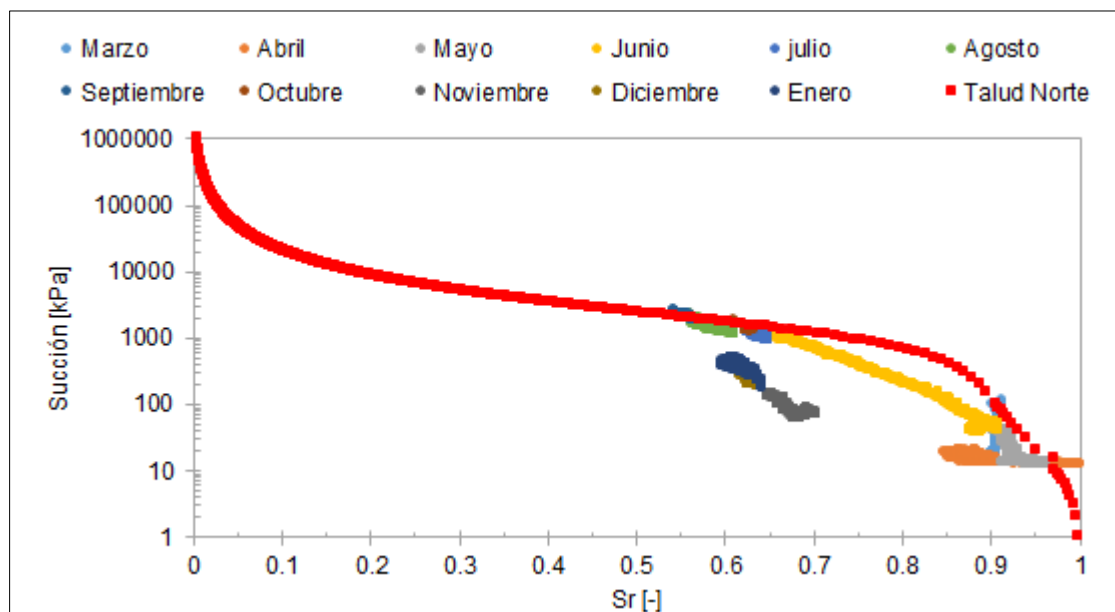
3.4.2 Curva de retención

De los datos presentados en la Figura 39 y Figura 40 se obtiene el máximo contenido de humedad (VWC) igual a $0,301 \text{ m}^3/\text{m}^3$ y $0,281 \text{ m}^3/\text{m}^3$ para el talud norte y sur respectivamente durante el año que se está analizando. A partir de los datos de (VWC) se calcula el grado de saturación para cada talud y con la presión de líquido (succión) se grafica la curva de retención a partir de los datos in situ que se presenta en la Figura 43 y Figura 44. Para un mejor entendimiento de las distintas trayectorias se ha ubicado los meses a los que corresponde cada tramo de la curva de retención en cada talud para las profundidades de 16 y 36 cm.

La Figura 43 y Figura 44 a) y b) permite comprender el comportamiento del suelo en cada mes del año a -16 cm y -36 cm de profundidad. Inicialmente cuando las precipitaciones son frecuentes (ver Figura 33) el suelo alcanza valores muy cercanos a la saturación con succiones del orden de 10 kPa y conforme la temperatura ambiente (ver Figura 32) aumenta el suelo pierde humedad y hace que en cada talud se defina una trayectoria denominada de secado hasta el mes de agosto. Al iniciar las precipitaciones en el mes de octubre el suelo empieza a describir una trayectoria que se denomina de humectación (mojado) hasta llegar a valores muy cercanos de succión inicial, pero con distinto grado de saturación. La trayectoria es distinta en los meses de octubre y noviembre del 2017 para cada profundidad analizada. El suelo del terraplén es de baja densidad y estos episodios de mojado hacen que el suelo experimente un colapso y/o consolidación y por ende su porosidad se reduce provocando variaciones espurias del contenido volumétrico de agua.



a)

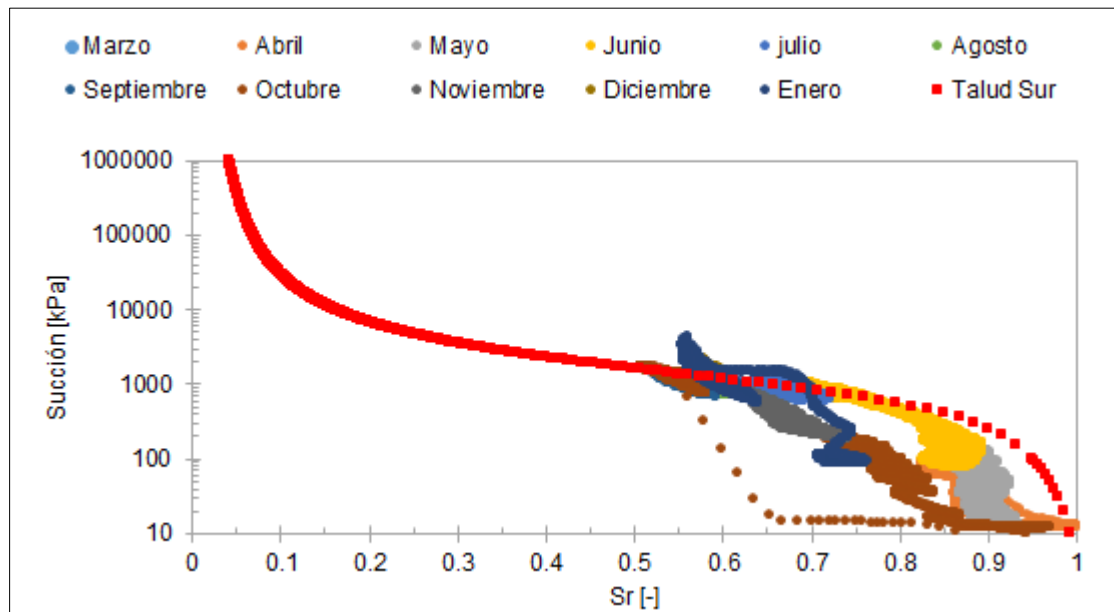


b)

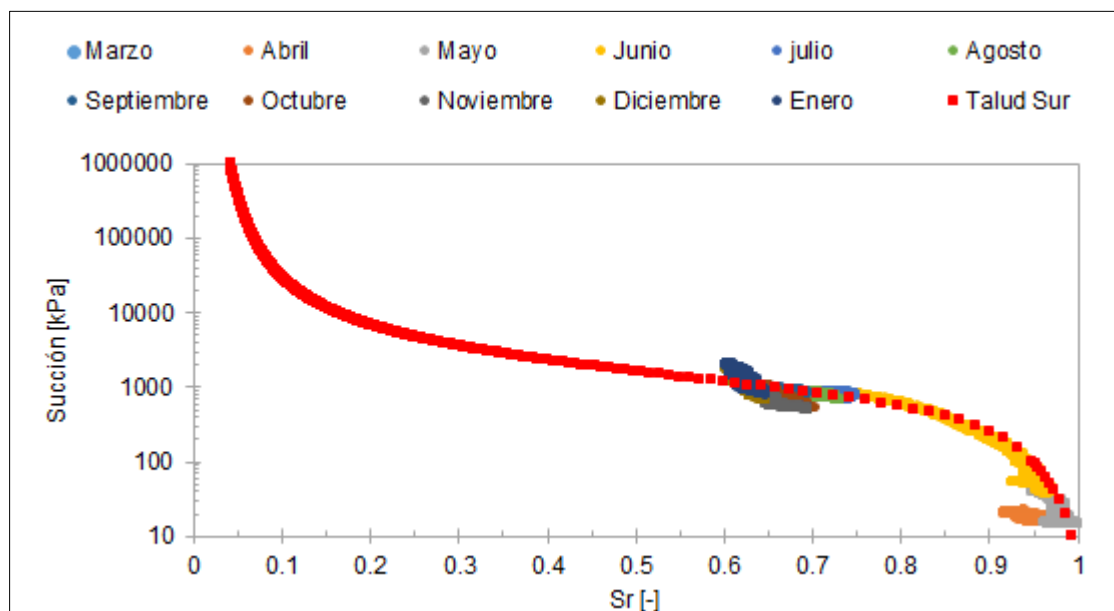
Figura 43. Grado de saturación vs succión en el talud norte **a)** -16 cm **b)** -36 cm de profundidad.

En ambos taludes se observa que las trayectorias humectación (mojado) a mayor profundidad (-36 cm) alcanzan valores de presión de líquido (succión) de 80 kPa y 500 kPa aproximadamente en el talud norte y sur respectivamente. La diferencia observada se relaciona con la porosidad y/o permeabilidad del suelo considerando al máximo contenido volumétrico de agua (VWC) como porosidad en condiciones saturadas. Esto implica que a mayor porosidad el agua se mueve por los espacios vacíos (poros) con mayor facilidad alterando su estado inicial tal como sucede en el talud norte. En el talud sur donde el VWC es menor, el agua que se infiltra desde la superficie no realiza cambios tan significativos de VCW a -36 cm y -56 cm como se observa en la Figura 40,

a diferencia de lo que ocurre en el talud norte donde a la misma profundidad (-36 cm) hay un cambio brusco (pico) como se indica en la Figura 39.



a)



b)

Figura 44. Grado de saturación vs succión en el talud sur a) -16 cm b) -36 cm de profundidad.

4 Modelación Termo-hidráulica (TH)

4.1 Ecuaciones de gobierno

El comportamiento de suelos no saturados depende de la transferencia de agua y energía entre la atmósfera y el suelo que a su vez se relaciona con las propiedades hidromecánicas y las condiciones del entorno. Las propiedades hidromecánicas permiten el flujo de masa a través del movimiento del agua líquida debido a los efectos combinados de precipitación, infiltración y flujo de agua subterránea, junto con el flujo de agua de vapor resultante de la evaporación (An, Hemmati, and Cui 2017), donde la radiación solar es la principal fuente de energía para producir transferencia de calor. Solo la radiación solar neta es la que contribuye que se produzca evaporación en la superficie del suelo debido a la transferencia de energía y al gradiente de presión de vapor que sale cerca de la superficie del suelo. Los distintos tipos de flujo que intervienen se presentan en la Tabla 15 y las ecuaciones se presentan en el anexo 1.

Tabla 15. Tipos de flujo que intervienen en la condición atmosférica.

Tipo de flujo	Parámetros	Notación
Flujo de agua	Precipitación	P
	Evaporación E	E
	Flujo advectivo de vapor por la fase gas	j_g^w
	Escorrentía	j_{sr}
Flujo de aire	Parte advectiva	j_a
Flujo de energía	Calor sensible	H_s
	Calor convectivo	H_c
	Radiación neta	R_n

La determinación de estos flujos de masa y energía que atraviesan la interfase suelo-atmósfera requiere un análisis de masa y transferencia de calor acoplados. Code_Bright permite realizar este acoplamiento (TH) bajo condiciones climáticas presentando el intercambio de flujo y calor en función de las variables de estado P_l , P_g , T .

4.1.1 Flujo de agua j_w

El flujo de agua que se infiltra en el suelo es la suma de la precipitación P , evaporación E y el flujo advectivo de vapor por la fase gaseosa J_g^w y de la escorrentía superficial J_{sr} .

$$j_w = k_{rain}P + K_{evap}E + j_g^w + j_{sr} \quad \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right] \quad (21)$$

Donde k_{rain} y k_{evap} son datos de entrada y se pueden usar para desactivar su flujo respectivo para simular condiciones controladas (laboratorio). Los flujos de entrada se consideran positivos [+] y negativos [-] los flujos de salida para la simulación

Evaporación. - Está dada por una relación de difusión aerodinámica.

$$E = \frac{k^2 v_a \phi}{\ln\left(\frac{z_a}{z_o}\right)^2} (\rho_{va} - \rho_v) \quad (22)$$

Donde ρ_{va} y ρ_v son la humedad absoluta (masa de vapor por volumen de gas, que se calcula a partir de la humedad relativa, H_r y la temperatura T) de la atmósfera y el nodo de la condición de contorno respectivamente, k es la constante de von Karman's igual a 0,4, ϕ es un factor estabilizador, z_o altura de la rugosidad, v_a es la velocidad del viento y z_a altura de la pantalla sobre la superficie a la que se miden la v_a y ρ_{va} . En teoría ρ_v puede ser el valor de la altura de la rugosidad (z_o). Code_Bright calcula a partir de las variables de estado en el nodo de la condición de contorno.

Flujo advectivo de vapor por la fase gas j_g^w .

$$\begin{aligned} j_g^w &= \omega_g^w q_g & P_g > P_{ga} \\ j_g^w &= \frac{\rho_{va}}{\rho_{ga}} q_g & P_g \leq P_{ga} \end{aligned} \quad (23)$$

Donde ω_g^w es la fracción de masa de vapor, q_g es el flujo de la fase gaseosa, P_g es la presión de gas, P_{ga} es la presión atmosférica, ρ_{va} densidad de vapor y ρ_{ga} densidad atmosférica del gas.

$$q_g = \gamma_g (P_g - P_{ga}) \quad \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right] \quad (24)$$

Donde γ_g es un coeficiente almacenamiento.

Escurrentía superficial j_{sr}

$$\begin{aligned} j_{sr} &= \gamma_w (P_l - P_{ga}) & P_l > P_{ga} \\ j_{sr} &= 0 & P_l \leq P_{ga} \end{aligned} \quad \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right] \quad (25)$$

Donde γ_w (s/m) es otro coeficiente de almacenamiento. Debe ser dicho que la estanqueidad no se simula explícitamente, es decir, Code_Bright no tiene un elemento especial que representa el almacenamiento del agua en un estanque. Cuando se supone que no hay estancamiento, se puede usar un valor muy alto para γ_w (pero no demasiado alto para evitar inestabilidades numéricas). Entonces, si el suelo está saturado ($P_l > P_{ga}$) toda la precipitación que no pueda infiltrarse se escurrirá J_{sr} .

4.1.2 Flujo de aire j_a

Para el flujo de aire solo se considera la parte advectiva.

$$J_a = \omega_g^a q_g = (1 - \omega_g^w) q_g \quad \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right] \quad (26)$$

4.1.3 Flujo de energía J_e

El flujo de energía atmosférico que llega a la superficie del suelo está compuesto por el flujo de calor sensible (H_s), el flujo convectivo de calor por el agua, aire y vapor (H_c) y la radiación neta (R_n).

$$J_e = H_s + H_c + R_n \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s} \right] \quad (27)$$

El flujo de calor sensible (H_s) se calcula a partir de la relación de difusión aerodinámica r_a .

$$H_s = \rho_{ga} \cdot C_a \cdot r_a \cdot (T_a - T_o) \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s} \right] \quad (28)$$

Dónde:

C_a es el calor específico, T_o es la temperatura de la atmósfera y:

$$r_a = \frac{k^2 v_a \phi}{\left(\ln \left(\frac{z_a}{z_o} \right) \right)^2} \quad [-] \quad (29)$$

Donde v_a es la velocidad del viento a una altura z_a , z_o es la altura de la rugosidad del terreno, k es la constante de von Karman (generalmente 0,4), y ϕ es un parámetro estabilizador.

Flujo de calor convectivo. - Se calcula teniendo en cuenta la energía interna del agua líquida, vapor y aire:

$$H_c = h_v(E_v + j_g^w) + h_l(P + j_l^w) + h_a j_l^a \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s} \right] \quad (30)$$

Donde h_v , h_l y h_a son la energía libre de vapor, agua líquida y aire, respectivamente. Estas tres propiedades dependen de la temperatura: las temperaturas utilizadas son la temperatura en el nodo del límite para h_v , y h_a y la temperatura del punto de rocío, que depende de la presión de vapor atmosférico, para h_l .

Radiación neta

La principal entrada de energía en modelos que considera la interacción “suelo-vegetación-atmósfera” es la radiación solar que se divide en la radiación de onda corta, recibida del sol y la radiación de onda larga emitida por la tierra y la atmósfera. La radiación neta R_n es la suma de la radiación de onda corta neta R_{ns} y la radiación de onda larga neta R_{nl} (Dandar et al. 2017).

$$\begin{aligned}
R_n &= R_{ns} + R_{nl} \\
R_n &= (1 - A)R_g + R_{L,down} - R_{L,up} \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s} \right] \\
R_n &= (1 - A_l)R_g + \varepsilon S_l R_a - \varepsilon \sigma T_{sf}^4
\end{aligned} \tag{31}$$

Donde R_g es la fracción de la radiación solar que se refleja en la superficie, R_{nl} radiación de onda larga es la diferencia entre la radiación recibida $R_{L,down}$ y la radiación emitida $R_{L,up}$.

El albedo A_l y la emisividad ε se consideran función de la saturación.

$$\begin{aligned}
A_l &= A_d + (A_d - A_w)(S_l^2 - 2S_l) \\
\varepsilon &= 0.9 + 0.05S_l
\end{aligned} \quad [-] \tag{32}$$

Radiación solar directa de longitud de onda corta (radiación extraterrestre) $R_{sol, et}$

$$\begin{aligned}
R_{sol, et} &= S_0 f_e \max(\mathbf{s}^T \mathbf{p}, 0) \quad \text{if } s_{up} > 0 \\
R_{sol, et} &= 0 \quad \text{otherwise}
\end{aligned} \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s} \right] \tag{33}$$

Donde S_0 es la constante solar ($1367 \text{ J/m}^2\text{s}$), donde f_e es el factor que corrige la excentricidad de la órbita de la tierra y se calcula a partir de (Allen et al. 1998).

$$f_e = 1 + 0.033 \cos \left(2\pi \frac{t - t_{ph}}{d_a} \right) \quad [-] \tag{34}$$

Donde d_a es la duración de un año ($365.241 \text{ días} = 3.15568 \cdot 10^7 \text{ s}$), t es el tiempo y el tiempo en el perihelio t_{ph} aproximadamente el 3 de enero.

La radiación solar en una superficie horizontal puede ser simplificada por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
R_{sol, et, hor} &= S_0 f_e s_{up} = S_0 f_e (\cos \delta \cos \lambda \cos \theta + \sin \delta \sin \lambda) \quad \text{if } s_{up} > 0 \\
R_{sol, et, hor} &= 0 \quad \text{otherwise}
\end{aligned} \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s} \right] \tag{35}$$

Para el cálculo de la posición del sol y del azimut, es conveniente definir dos vectores unitarios: p que es ortogonal a la superficie terrestre y s que apunta al sol. Su primer componente apunta hacia el este, el segundo hacia el norte y el tercero hacia arriba. El vector p se puede calcular a partir de los ángulos strike (α), dip (β) y el vector s con la declinación del sol (δ), tiempo solar (ω) y la latitud (λ) (Blanco-Muriel et al. 2001; Sproul 2007).

$$p = \begin{pmatrix} p_{est} \\ p_{nort} \\ p_{up} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha \sin \beta \\ -\sin \alpha \sin \beta \\ \cos \beta \end{pmatrix}$$

$$s = \begin{pmatrix} p_{est} \\ p_{nort} \\ p_{up} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \delta \sin \omega \\ \sin \delta \sin \lambda - \cos \delta \sin \lambda \cos \omega \\ \cos \delta \cos \lambda \cos \omega + \sin \delta \sin \lambda \end{pmatrix} \quad \text{si } \lambda \geq 0 \text{ Hemisferio N.} \quad (36)$$

$$s = \begin{pmatrix} p_{est} \\ p_{nort} \\ p_{up} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\cos \delta \sin \omega \\ -\sin \delta \sin \lambda + \cos \delta \sin \lambda \cos \omega \\ \cos \delta \cos \lambda \cos \omega + \sin \delta \sin \lambda \end{pmatrix} \quad \text{si } \lambda < 0 \text{ Hemisferio S.}$$

La declinación del sol (δ) se obtiene a partir de la declinación máxima del sol (0,4091 rad = 23,26°), t es el tiempo en segundos, t_s es el momento en que comienza el otoño (21 de septiembre para el hemisferio norte).

$$\delta = -\delta_{max} \sin \left(2\pi \frac{t - t_s}{d_a} \right) \quad (37)$$

El tiempo solar (ω) se obtiene tomando en cuenta la hora al medio día t_m , la duración de un día $d_d = 86\,400$ s

$$\omega = 2\pi \frac{t - t_m}{d_d} \quad (38)$$

Radiación solar y el efecto de la atmósfera

Parte de la radiación solar es absorbida por la atmósfera que se expresa como la transmisividad atmosférica τ_a , que se define como cociente entre la radiación solar horizontal real ($R_{S, hor}$) dividida por la extraterrestre ($R_{S, hor, et}$), si no hay datos medidos de $R_{S, hor}$, τ_a se obtiene a partir de las horas de sol relativas n / N (horas de luz solar n divididas por horas de luz diurna N), si no hay datos disponibles horas de sol relativas, se utiliza el método de Hargeaves (Hargreaves and Allen 2003).

$$\tau_a = K_H \sqrt{T_a^{max} - T_a^{min}} \quad (39)$$

Donde T_a^{max} y T_a^{min} son la temperatura atmosférica máxima y mínima diaria y K_H es una constante empírica. (Allen et al. 1998) recomienda $K_H = 0,16$ para interior y $K_H = 0,19$ para regiones costeras. Otro factor a tomar en cuenta es la atmósfera que dispersa la luz solar, de modo que una superficie recibe parte de la radiación solar directamente del sol y otra parte en forma dispersa o difusa. Una superficie inclinada a la sombra no recibe radiación solar directa solo difusa. La fracción de radiación solar difusa sobre la radiación solar total (f_{dif}) se puede estimar mediante ecuaciones empíricas en función de la transmisividad atmosférica (τ_a) (Boland, Ridley, and Brown 2007).

$$f_{dif} = \frac{1}{1 + \exp(8.6\tau_a - 5)} \quad (40)$$

Para realizar el calcula de la radiación solar en una superficie inclinada se utiliza la siguiente expresión

$$\begin{aligned}
 R_s &= S_0 f_e \tau_a \left[(1 - f_{dif}) \max(\mathbf{p}^T \mathbf{s}, 0) + f_{dif} f_{sv} s_{up} + A_l (1 - f_{sv}) s_{up} \right] \\
 &= R_{S,hor} \left[(1 - f_{dif}) \frac{\max(\mathbf{p}^T \mathbf{s}, 0)}{s_{up}} + f_{dif} f_{sv} + A_l (1 - f_{sv}) \right]
 \end{aligned} \quad (41)$$

El primer término representa la radiación solar directa, el segundo término la radiación solar difusa y el tercer término es la cantidad de la radiación solar reflejante del entorno. El factor sky view (f_{sv}) es la proporción del cielo sobre la superficie inclinada que no está bloqueada por el plano horizontal circundante que va desde 0,5 para una vertical a 1 para una superficie horizontal y se obtiene con la siguiente expresión (Badescu 2002).

$$f_{sv} = \frac{\cos(2\beta) + 3}{4} \quad (42)$$

La radiación de onda larga ascendente $R_{L,up}$

$R_{L,up}$ se calcula a partir de la ley de Stefan-Boltzmann que establece que la potencia emitida por un cuerpo negro varía con la potencia cuarta de su temperatura absoluta, y la potencia emitida por una superficie real es algo menor, controlada por la emisividad de dicha superficie ε .

$$R_{L,up} = \varepsilon \sigma T_{sf}^4 \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s} \right] \quad (43)$$

Donde ε es la emisividad superficial, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,7 \times 10^{-8}$ J/s m² K⁴) y T_{sf} es la temperatura superficial (K).

La radiación de onda larga descendente $R_{L,down}$

La superficie de la tierra también recibe radiación de onda larga emitida por la atmósfera y las superficies circundantes, esta radiación atmosférica de onda larga $R_{L,down}$ definida como R_a depende de la temperatura atmosférica y de la humedad absoluta según una relación empírica:

$$R_a = \sigma T_a^4 (0.605 + 0.048 \sqrt{1370 \rho_{va}}) \quad \left[\frac{J}{m^2 \cdot s} \right] \quad (44)$$

4.2 Geometría y condiciones de contorno

4.2.1 Geometría

En Code_Bright se define la geometría de cada talud que corresponde al área no vegetada de la Figura 14. Debido a la irregularidad que presenta el estrato de suelo se considera dos superficies que representan el mismo tipo de suelo indicadas en la Figura 45 y Figura 46. La pendiente media de los taludes norte y sur es 33° con un espesor en la zona media de 86 y 72 cm respectivamente. La parte superior es de 41 cm aproximadamente. El detalle del perfil B-B para cada talud se presenta en el plano SMuCPHy 01/04 del anexo 5.

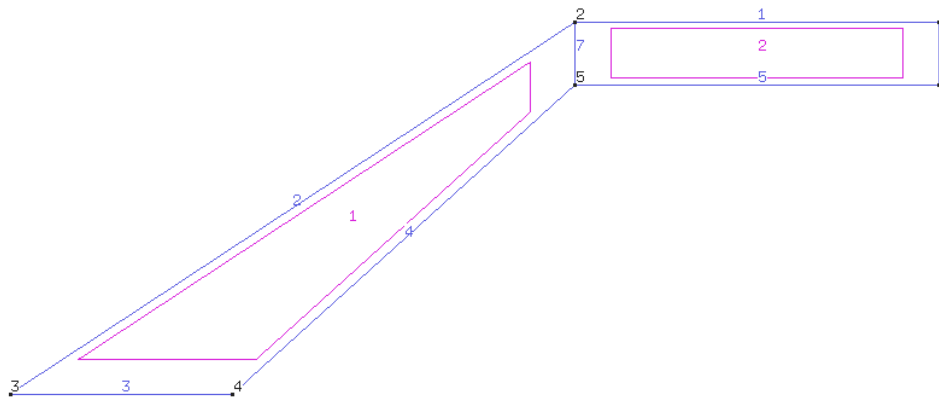


Figura 45. Geometría de talud norte.

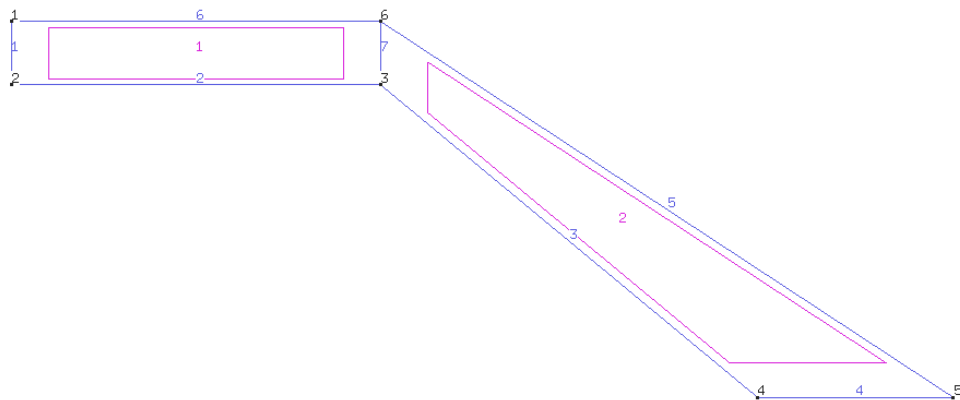


Figura 46. Geometría del talud sur.

4.2.2 Malla de elementos finitos

Para realizar la modelación se define la malla de elementos finitos estructurada con 1170 cuadriláteros y 1254 nodos realizando una concentración de elementos desde la parte superficial hacia la parte interna de los taludes con la finalidad de obtener resultados más detallados y precisos en la zona donde se produce la interacción suelo – atmósfera como se indica en la Figura 47 y Figura 48.

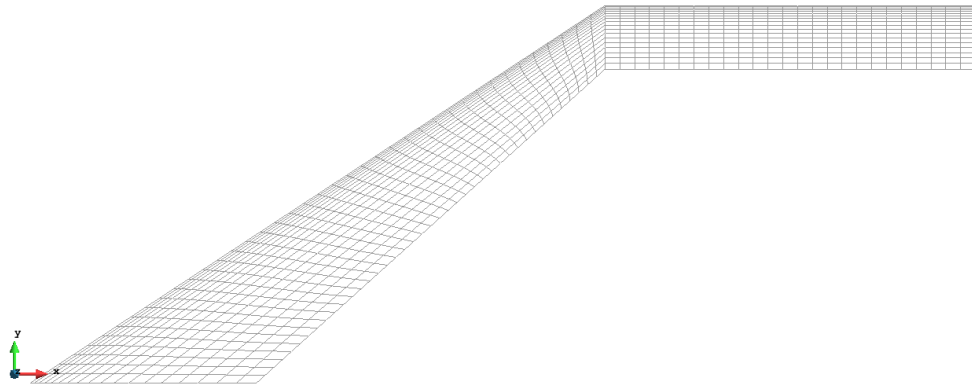


Figura 47. Malla de elementos finitos del talud norte.

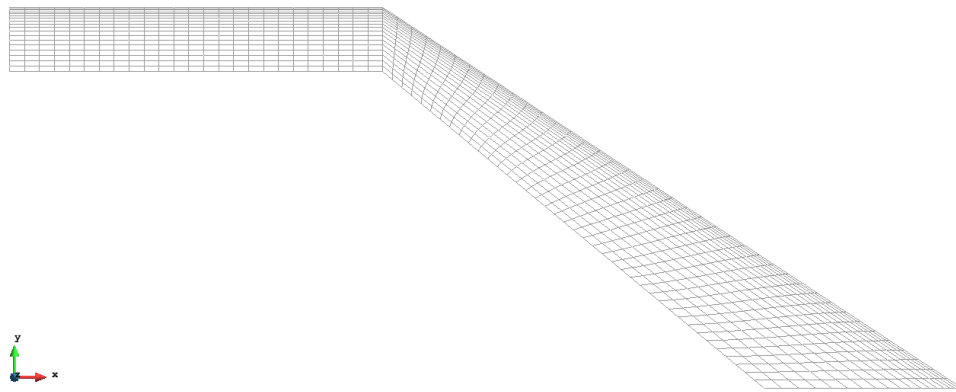


Figura 48. Malla de elementos finitos del talud sur.

4.2.3 Condiciones iniciales

Para establecer las condiciones iniciales en los taludes norte y sur del terraplén experimental se establece como tiempo de inicio para la modelación el día 11 de enero del 2017 fecha cuando se ejecuta el terraplén (Cevallos 2017). Desde la fecha de la construcción hasta el 28 de marzo de 2017 cuando se instalaron los primeros sensores no existe datos registrados por lo cual las condiciones iniciales se han establecido de acuerdo a las siguientes hipótesis: 1) La época del año que corresponde a estas fechas es invierno por lo tanto es de esperar que el suelo tenga una humedad alta. 2) La orientación (Strike) de los taludes norte y sur es 268° y 88° que permite decir que la temperatura del talud norte es menor comparada al lado sur que recibe radiación de manera directa durante todo el año. 3) La presión P_{ga} se considera constante igual a la presión atmosférica 0,1 MPa por lo tanto no se considera la ecuación de balance de aire que equivale a considerar la fase de gas perfectamente móvil para este caso. Bajo estas hipótesis se establece la presión de líquido (P); la presión de gas (P_g) y la temperatura (T) en la siguiente tabla.

Tabla 16. Condiciones iniciales.

Parámetros	Condiciones iniciales		Und.
	Norte	Sur	
P_i	-0,05	-0,05	MPa
P_g	0,10	0,10	MPa
T	12,00	15,70	° C

De acuerdo a (Cevallos 2017) la compactación del terraplén no fue controlada por número de capas, por tal motivo las condiciones en cada talud son distintas y se asume una porosidad distinta para cada modelo para el talud norte de 0,316 y talud sur 0,281 de acuerdo a lo analizado en el apartado 3.4.

4.2.4 Condiciones de contorno

En la Figura 49 se presenta las condiciones de contorno impuestas en Code_Bright, conforme a la construcción del terraplén, estableciendo así un contorno impermeable (flujo nulo) en el perfil interno del terraplén que representa la membrana impermeable y en los perfiles externos de cada talud se aplica la condición de flujo atmosférico donde intervienen las variables descritas en el capítulo 4 que se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Condición de contorno atmosférica.

Condiciones Atmosféricas	Notación	Talud Norte	Talud Sur	Und.
Latitud	λ	0.72069	0.72069	rad
Tiempo cuando inicia el otoño	t_s	22723200	22723200	s
Tiempo al medio día	t_m	43200	43200	s
Altura de rugosidad de la superficie	z_0	0.001	0.0001	m
Altura de medición de viento	z_a	2	2	m
Factor de estabilidad	ϕ	1	1	-
Densidad del gas atmosférico	ρ_{ga}	1.2	1.2	kg.m ⁻³
Albedo seco	A_d	0.4	0.4	-
Albedo húmedo	A_w	0.2	0.2	-
Coeficiente de almacenamiento de gas	γ_g	0	0	kg.m ⁻² s ⁻¹ MPa ⁻¹
Coeficiente de almacenamiento de líquido	γ_l	-1E+06	-1E+06	kg.m ⁻² s ⁻¹ MPa ⁻¹
Factor de lluvia	K_{rain}	1	1	-
Factor de radiación	K_{rad}	1	1	-
Factor de evaporación	K_{evap}	1	1	-
Dip	θ	0.575	0.575	rad
Strike	σ	4.677	1.535	rad
Tipo de radiación*		5	5	-
Fracción de vegetación		0	0	

*Subrutina de cálculo en Code_Bright para estimar la radiación neta a partir de los datos de entrada en el archivo *atm.dat*. En este modelo TH no se considera ningún factor de vegetación.

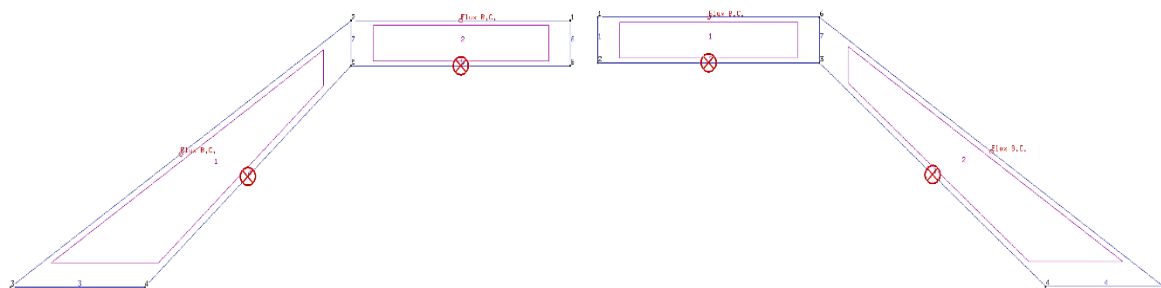


Figura 49. Condiciones de contorno

Las variables ambientales de la Tabla 18 se toman de la estación meteorológica Viladecans y se almacenan cada hora durante el periodo de un año en el archivo *root_atm.dat* como indica la guía de CB (Departament d' Enginyeria del Terreny Cartografia i 2017) para cada talud.

Tabla 18. Datos de variables atmosféricas en el tiempo.

Parámetro	Unidad
Temperatura atmosférica , T_a	° C
Presión de gas atmosférica , P_{ga}	MPa
Humedad relativa, H_r	-
Radiación, R_n	J.m ⁻² .s ⁻¹
Índice de nubosidad, I_n	-
Precipitación , P	kg m ⁻² .s ⁻¹
Velocidad de viento, v_a	m.s ⁻¹

En el perfil interno de cada talud se impone la temperatura del sensor 5TE a -56 cm y -57 cm muy cerca del contorno. Los datos de temperatura se imponen cada hora para todo el tiempo de modelación, para los primeros meses donde aún no se registran datos de temperatura del suelo se ha rellenado con datos de la estación meteorológica Viladecans registrada a 50 cm de profundidad. En la Figura 50 se presenta los datos impuestos mediante un archivo *root_bcf.dat* que utiliza CB.

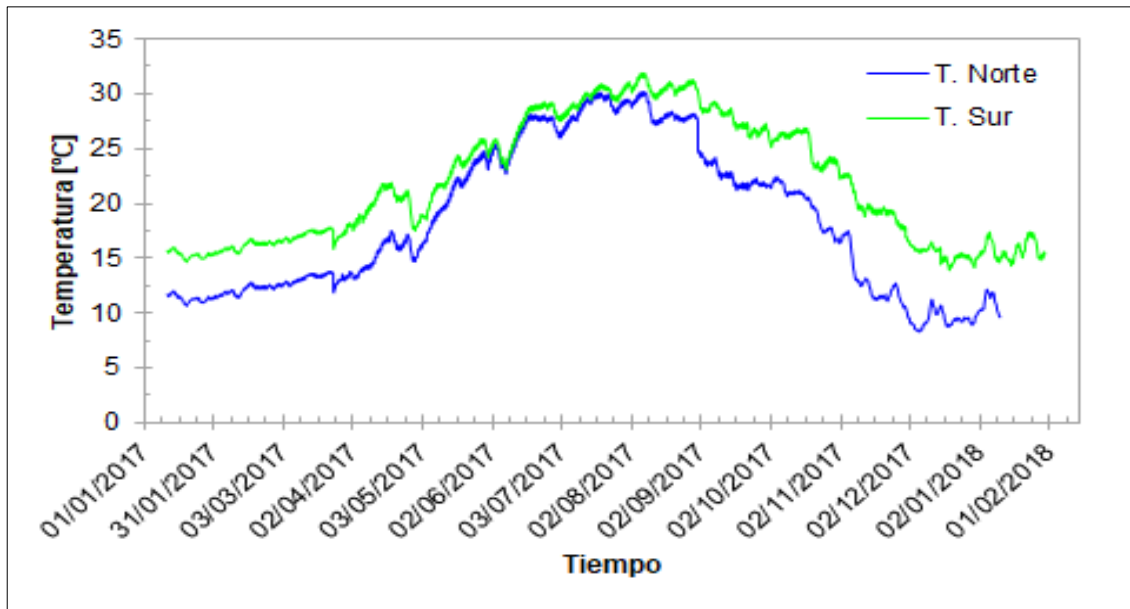


Figura 50. Temperatura del suelo del talud norte y sur a 50 cm de profundidad.

4.3 Parámetros del material

El material que se utilizó para la construcción del terraplén corresponde a un suelo fino de baja plasticidad de características semejantes a las de los suelos naturales limos del delta de Llobregat de acuerdo a lo que indicado por (Cevallos 2017) en el TFM. En las siguientes tablas se resumen los parámetros Termo-Hidráulicos (TH) y las propiedades de las fases que han sido utilizados para la modelización del talud norte y sur del terraplén experimental que corresponde al área sin vegetación. A partir de ensayos de laboratorio y de la experiencia que se tiene con el suelo del delta de Llobregat se han estimado los parámetros para cada talud.

Tabla 19. Parámetros Termo – Hidráulicos.

Parámetros Termo - Hidráulicos		Talud Norte	Talud Sur
Curva de retención (modelo de Van Genuchten con doble porosidad)			
Valor de entrada de aire para la macroestructura	P_{oM} [MPa]	0,01	0,04
Factor para la función de forma - macroestructura	λ_M [-]	0,34	0,15
Valor de entrada de aire para la microestructura	P_{om} [MPa]	1,45	0,90
Factor para la función de forma - microestructura	λ_m [-]	0,45	0,50
Saturación residual	S_{rl} [-]	0	0
Saturación máxima	S_{ls} [-]	1	1
Factor de ponderación	ω [-]	0,87	0,75
Permeabilidad intrínseca (Modelo Kozeny)			
Permeabilidad intrínseca (1° dirección principal)	$(k_{11})_o$ [m^2]	$6,0 \cdot 10^{-16}$	$3,0 \cdot 10^{-16}$
Permeabilidad intrínseca (2° dirección principal)	$(k_{22})_o$ [m^2]	$6,0 \cdot 10^{-16}$	$3,0 \cdot 10^{-16}$
Permeabilidad intrínseca (3° dirección principal)	$(k_{33})_o$ [m^2]	$6,0 \cdot 10^{-16}$	$3,0 \cdot 10^{-16}$
Porosidad inicial del material	ϕ_o [-]	0,316	0,281
Porosidad mínima del material	ϕ_{min} [-]	0	0.
Permeabilidad relativa en la fase líquida (Modelo Van Genuchten)			
Potencia	λ [-]	0,26	0,30
Saturación residual	S_{rl} [-]	0	0
Saturación máxima	S_{ls} [-]	1	1
Flujo difusivo de vapor			
Parámetros para la difusión molecular de vapor o aire	D [$m^2 s^{-1} K^{-n} Pa$]	5,90E-06	5,90E-06
	n [-]	2,3	2,3
Coeficiente de tortuosidad	τ_o	1	1
Flujo conductivo de calor			
Conductividad térmica del medio poroso seco	λ_{dry} [$W m^{-1} K^{-1}$]	2	1
Conductividad térmica del medio poroso saturado con agua	λ_{sat} [$W m^{-1} K^{-1}$]	2,5	2,5

Para el talud norte y sur se establecen los mismos valores de las fases sólida, líquida y gas presentados en la Tabla 20.

Tabla 20. Propiedades de las fases.

Fase sólida		
Calor específico para la fase sólida	C_s [$J kg^{-1} K^{-1}$]	800
Densidad específica de las partículas sólidas	ρ_s [$kg m^{-3}$]	2700
Fase líquida		
Densidad de referencia	ρ_{lo} [$kg m^{-3}$]	1002,6
Compresibilidad	β [MPa^{-1}]	4,50E-04
Coeficiente volumétrico de expansión térmica	α [$^{\circ}C^{-1}$]	3,40E-04
Variación de solutos	γ [-]	0,6923
Presión de referencia	P_{lo} [MPa]	0,1
Fase gaseosa		
Masa molecular	M [$kg mol^{-1}$]	0,02895
Constante de Henry	H [MPa]	10000

En la modelación TH la curva de retención relaciona el grado de saturación con la succión que es una propiedad física muy importante en el estudio de suelos no saturados. (Cevallos 2017) explica el que el suelo utilizado para la construcción del terraplén proviene aparentemente de una deposición antrópica, presentando abundantes residuos de construcción y los finos son de características análogas a las de los limos del delta del Llobregat. El modelo de retención multimodal descrito en el Anexo 1 superpone dos curvas de retención (Van Genuchten) una para la macro y otra micro estructura (ecuación 45). Los parámetros del modelo que se ajustan con las medidas in situ relacionadas al VWC y la succión que se registra con los sensores MPS6 y 5TE a distinta profundidad se presentan en la Tabla 19. La doble porosidad que se incluye al modelo se debe a la presencia de finos en el material (limo) que con la presencia de agua se agrupan las partículas formando dos tipos estructuras la macro y micro. En la Figura 51 se presenta la curva de retención utilizada en cada modelo.

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = (1 - \omega) \left[1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda_M}} \right]^{-\lambda_M} + \omega \left[1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P_m} \right)^{\frac{1}{1-\lambda_m}} \right]^{-\lambda_m} \quad (45)$$

$$P = P_{0M} \frac{\sigma}{\sigma_m}, P_m = P_{0m} \frac{\sigma}{\sigma_m}$$

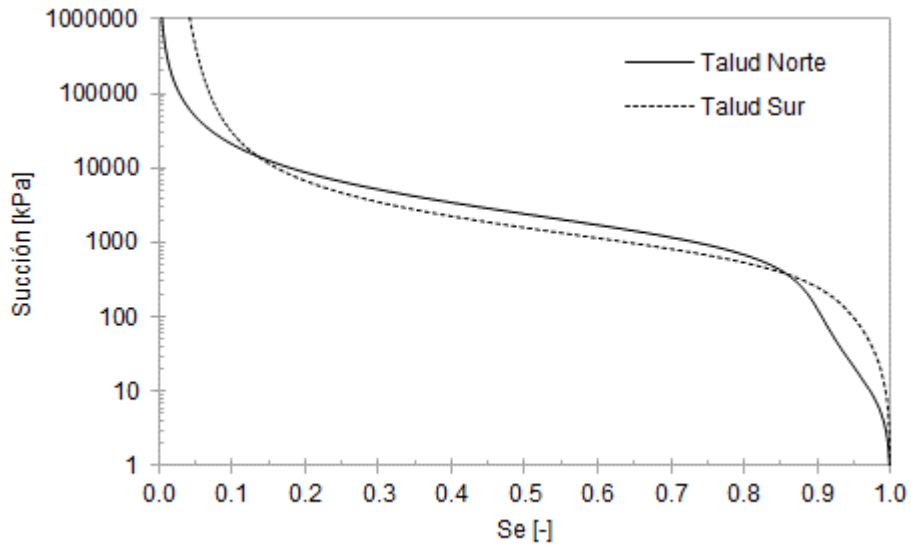


Figura 51. Curva de retención.

De forma analítica se obtiene el tamaño de poros aplicando la ecuación de Laplace

$$(P_g - P_l) = \frac{2\sigma}{r} \quad (46)$$

Donde P_l es la presión de líquido, P_g presión de gas, σ tensión superficial de 0,072 N/m a 20°C y r el radio de los meniscos.

En la Figura 52 se presenta el diámetro de los poros que corresponde al índice de vacíos que se relaciona con el grado de saturación. En la Figura 53 se presentan las curvas que definen la macro y micro estructura diferenciando el tamaño de poros entre 0,1 y 30 μm .

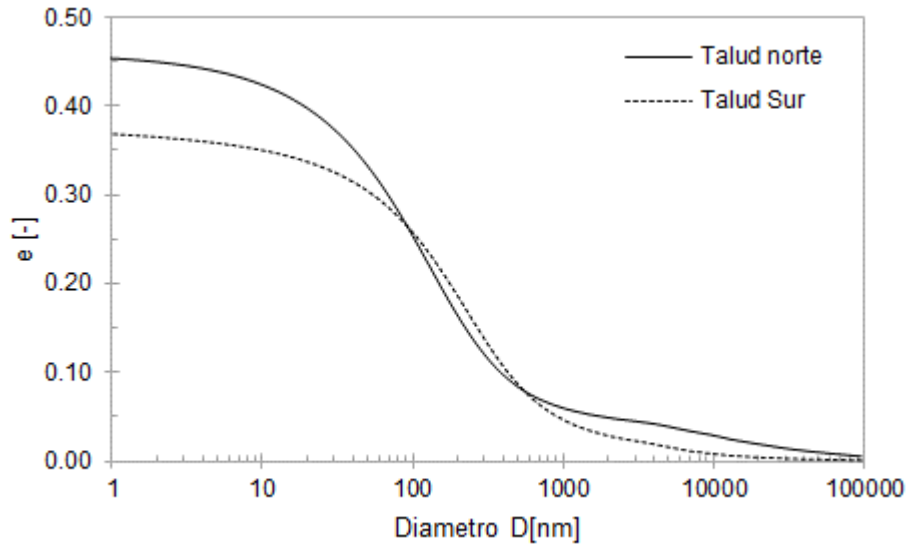


Figura 52. Relación de vacíos acumulada vs diámetro de los poros.

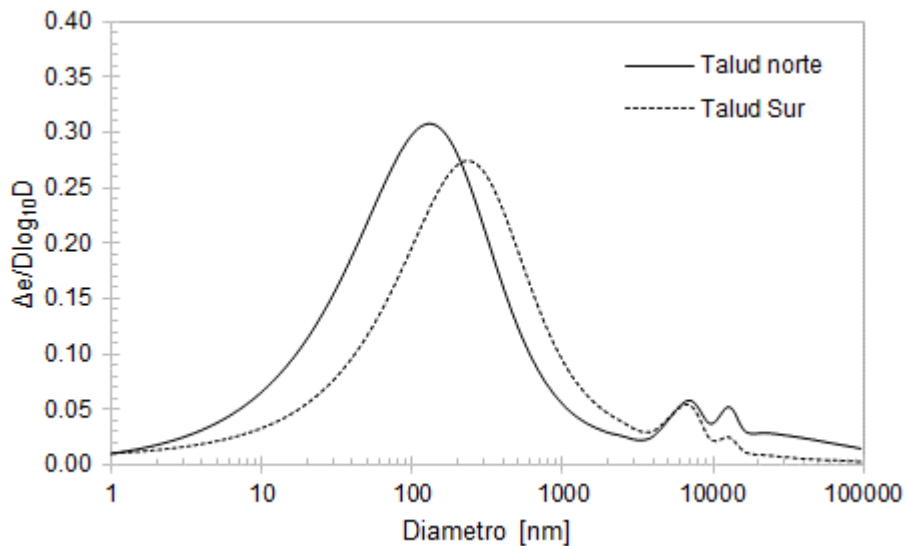


Figura 53. $\Delta e/\Delta \log_{10} D$ vs Diámetro de las partículas.

Otro parámetro para ajustar el modelo TH es la permeabilidad relativa del medio poroso que se presenta en la Figura 54 con respecto al grado de saturación efectivo S_e . Cuando el medio es saturado el flujo se obtiene a partir de la ley de Darcy donde interviene la conductividad hidráulica que representa la facilidad con la que el agua atraviesa un medio considerando una sola fase (agua). Cuando existe más de una fase (agua y aire) como en el caso de suelos no saturados el desplazamiento depende del gradiente de

presión, contenido de humedad y el grado de saturación. La interacción entre las dos fases durante el flujo se describe mediante la permeabilidad relativa del medio que es la relación entre la permeabilidad del medio para un fluido con un determinado grado de saturación (k_{nosat}) y la permeabilidad máxima (k_{sat}) respecto de la misma fase. El factor λ de la permeabilidad relativa se utiliza es 0,26 y 0,30 para el talud norte y sur que son valores inferiores al valor de λ de la curva de retención respectivamente, la diferencia se debe a que la curva de retención no considera la histéresis, el comportamiento denominado histéresis puede hacer que cambie el λ de la curva de retención, pero no el de la permeabilidad relativa. La permeabilidad relativa k_{rl} es una función derivada del modelo Van Genuchten (1980) que se calcula con la siguiente ecuación.

$$k_{rl} = \sqrt{S_e} \left(1 - (1 - S_e^{1/\lambda})^\lambda \right)^2 \quad (47)$$

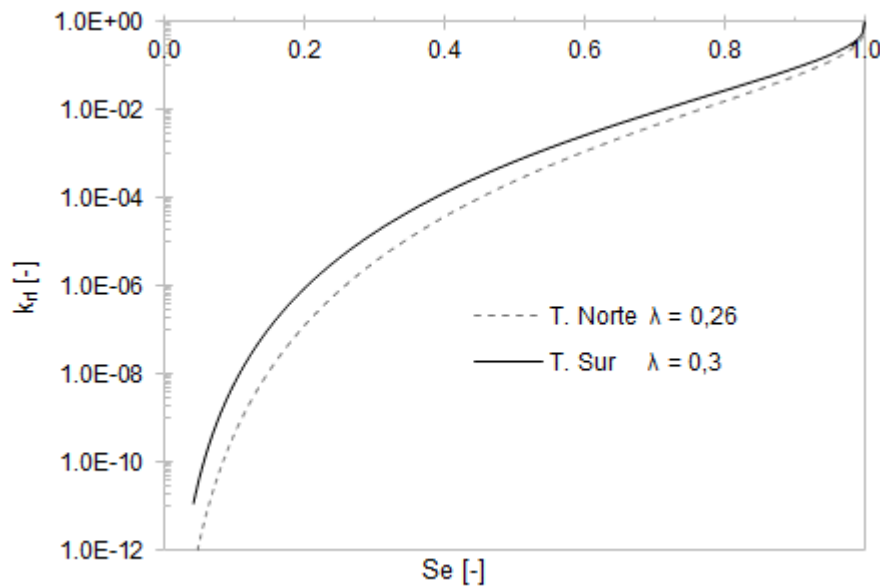


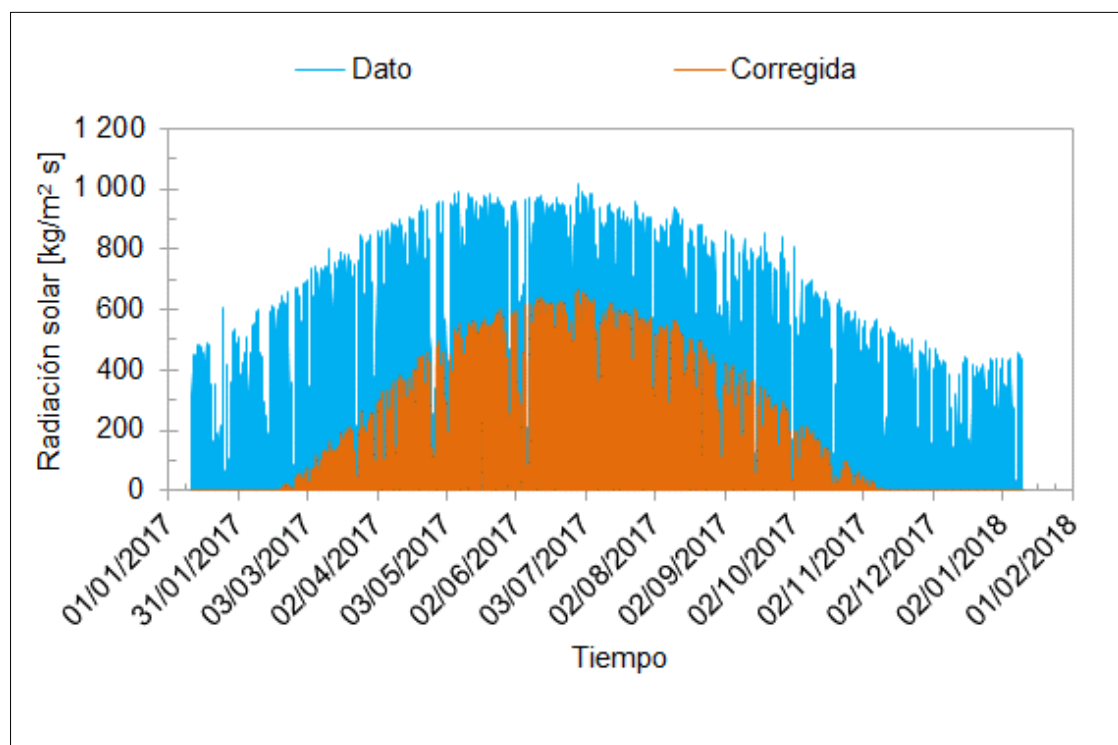
Figura 54. Permeabilidad relativa k_{rl} en función del grado de saturación efectivo.

5 Resultados y análisis

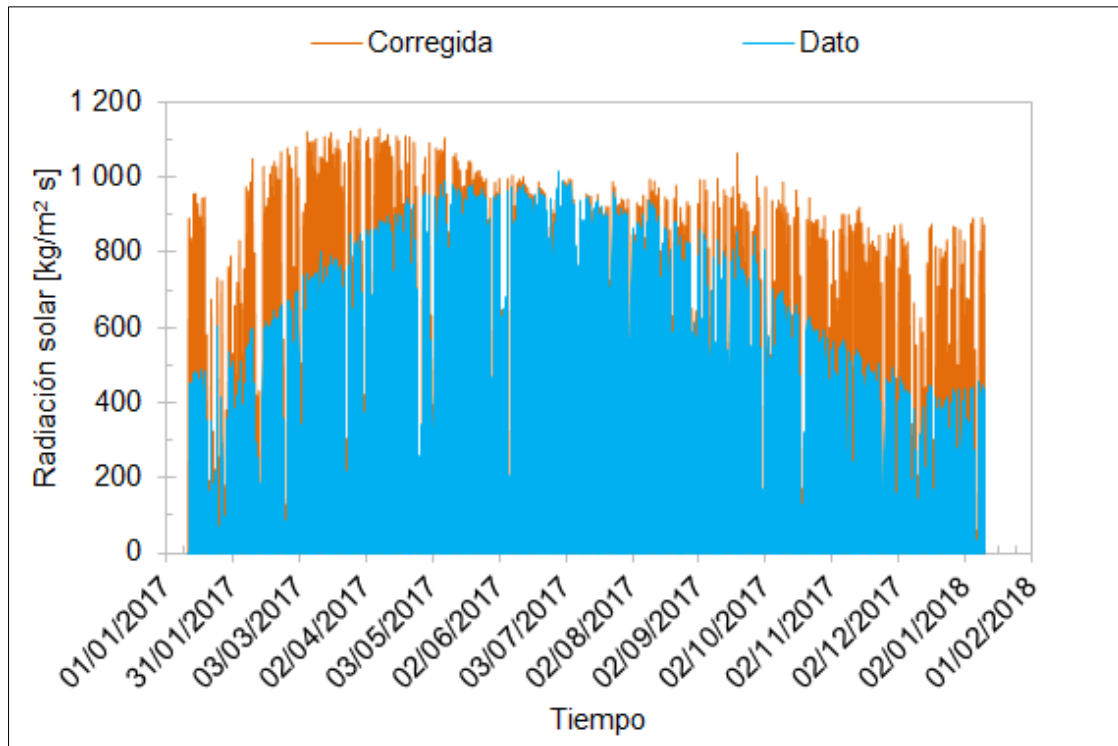
En este apartado se presentan los resultados de la modelación durante un año a partir del 11 de enero del 2017, utilizando el programa de elementos finitos Code_Bright que permite realizar un acoplamiento Termo – Hidráulico (TH) como se describe en el Anexo 1 para el talud norte y sur del área sin vegetación del terraplén experimental. En los siguientes apartados se analiza la variación de la temperatura del suelo (T), presión de líquido P , y el contenido volumétrico de agua (VWC) del suelo limoso del delta de Llobregat a distintas profundidades del terraplén.

5.1 Temperatura

En la interacción suelo – atmósfera la principal fuente de energía para exista transferencia de calor es la radiación solar. A falta de datos más locales, esta radiación ha sido tomada de la estación meteorológica de Viladecans medida sobre una superficie horizontal. Esta radiación se corrige de acuerdo a la ubicación que se describe de los ángulos strike a partir del norte (σ) y dip que representa pendiente de cada talud (θ). Los resultados se presentan en la Figura 55 a) y b) . Como se puede observar en el talud norte los meses de enero y diciembre la radiación solar no llega directamente a la cara del talud por lo tanto es igual a cero a diferencia del talud sur donde la radiación llega directamente a la cara del talud.



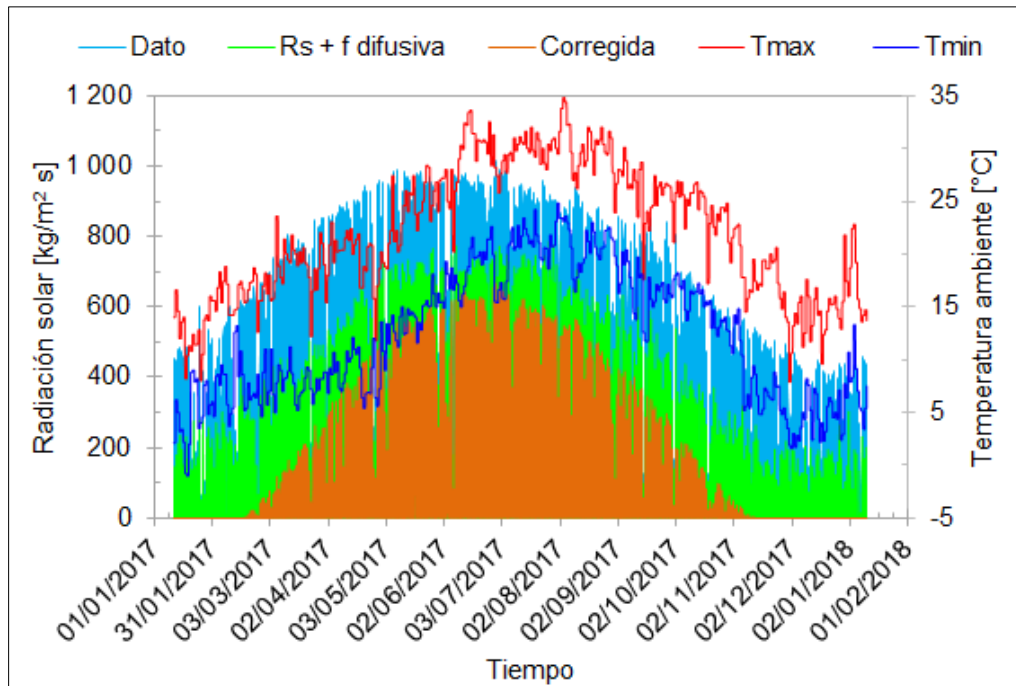
a)



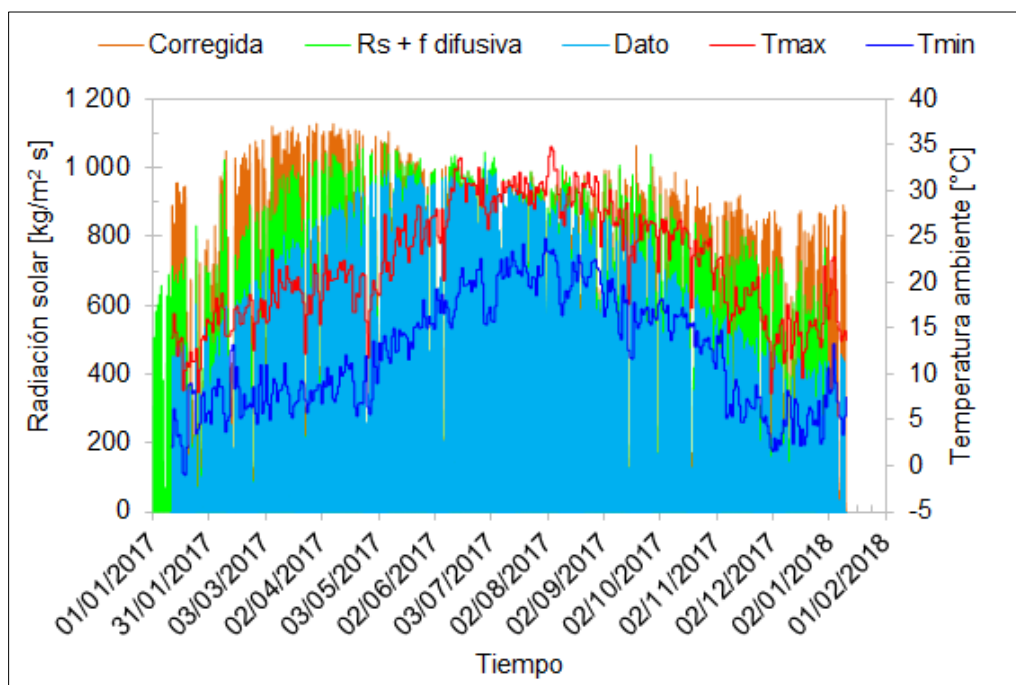
b)

Figura 55. Radiación solar corregida de acuerdo a la ubicación **a)** Talud norte, **b)** Talud sur.

En el apartado 4.1.3 se describe el efecto de la atmósfera y el factor sky view que afectan a la radiación solar aplicada sobre un plano inclinado (θ) de interés en el presente TFM para resolver el acoplamiento (TH) en cada talud. El resultado de la corrección se presenta en la Figura 56 que permite analizar dos superficies con la misma pendiente pero ubicadas hacia el norte y sur. En la cara norte no llega radiación solar directamente pero debido a los efectos de la atmósfera (dispersión y el factor sky view) los valores de radiación dejan de ser nulos y toman valores como se presenta en la Figura 56 a). En talud sur el efecto de la atmósfera hace que la radiación se disperse y llegue menos a la cara del talud Figura 56 b) en ambas graficas se ha dibujado la temperatura máxima y mínima diaria que permite cuantificar cuanta radiación es absorbida por la atmósfera a partir de la transmisividad atmosférica.



a)

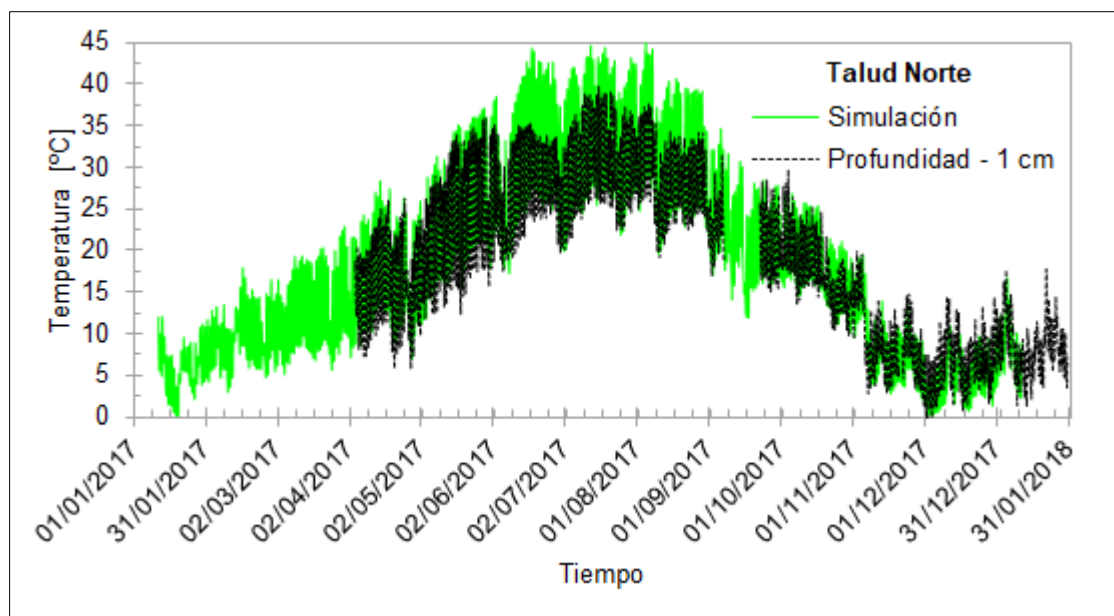


b)

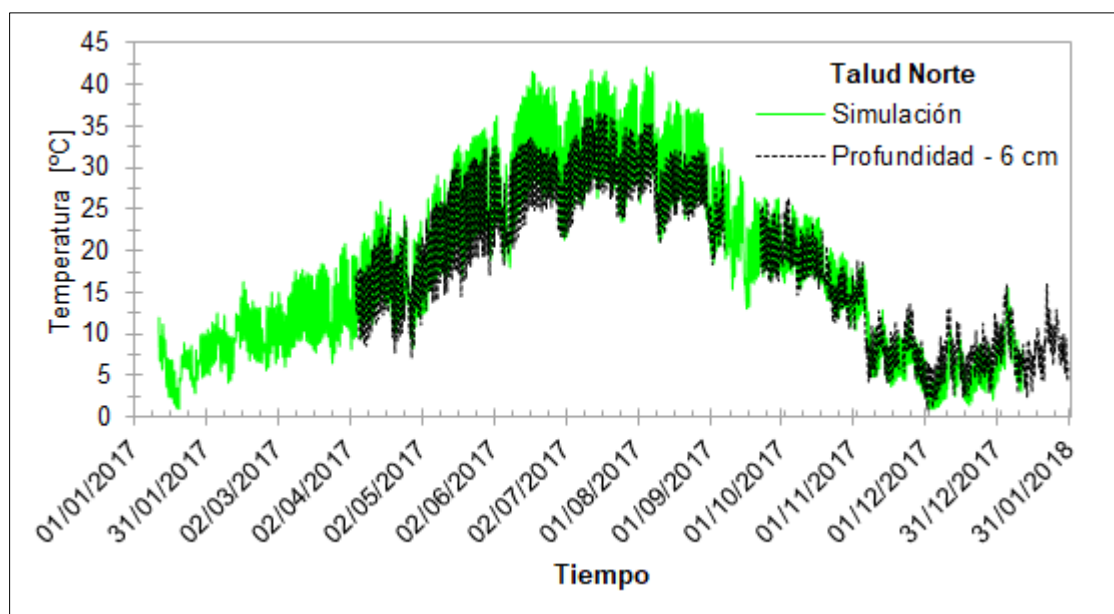
Figura 56 Radiación solar corregida por la ubicación y el efecto de la atmósfera **a)** Talud norte, **b)** Talud sur.

Una vez definida la cantidad de energía que llega a la superficie del talud norte y sur se resuelve el problema TH en el programa Code_Bright y se obtiene la temperatura del suelo a distintas profundidades que se presenta en la Figura 57 y Figura 58 que corresponde con la ubicación de los sensores T 107 y 5TE descritos en el apartado 3.1 de cada talud. Cabe destacar que bajo las mismas condiciones ambientales y el mismo

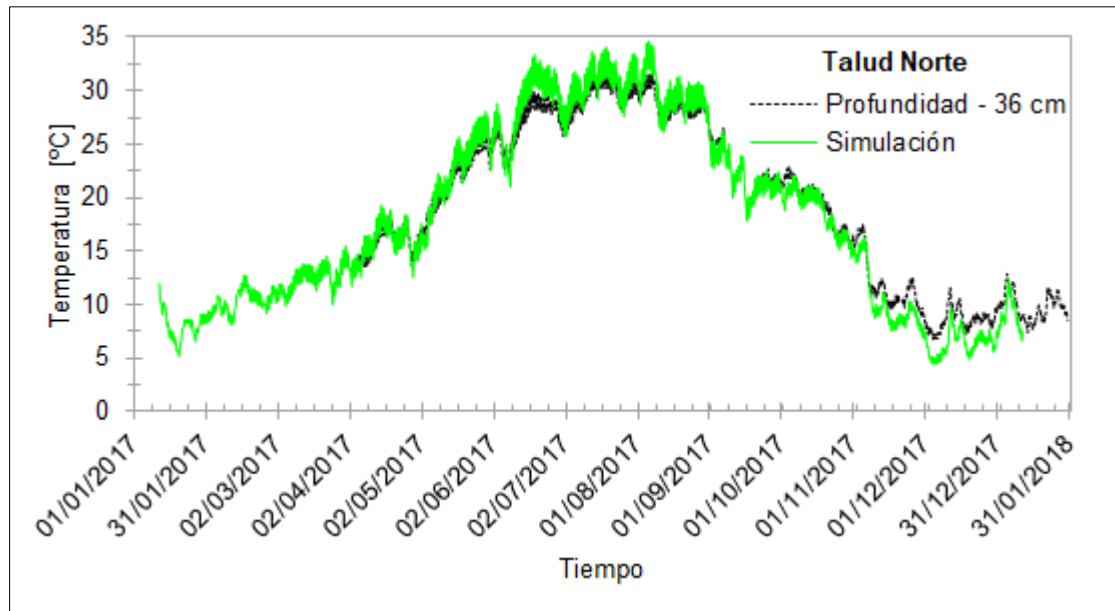
tipo de suelo, la temperatura superficial (-1 cm) medida y modelada es distinta en el lado norte y sur como se presenta en la Figura 57 a) y Figura 59 a), la diferencia de temperaturas del suelo es por la cantidad de radiación que recibe cada talud. La Figura 56 indica la corrección que se realiza respecto a la ubicación del sol y factores atmosféricos descritos en el apartado 4.1.3.



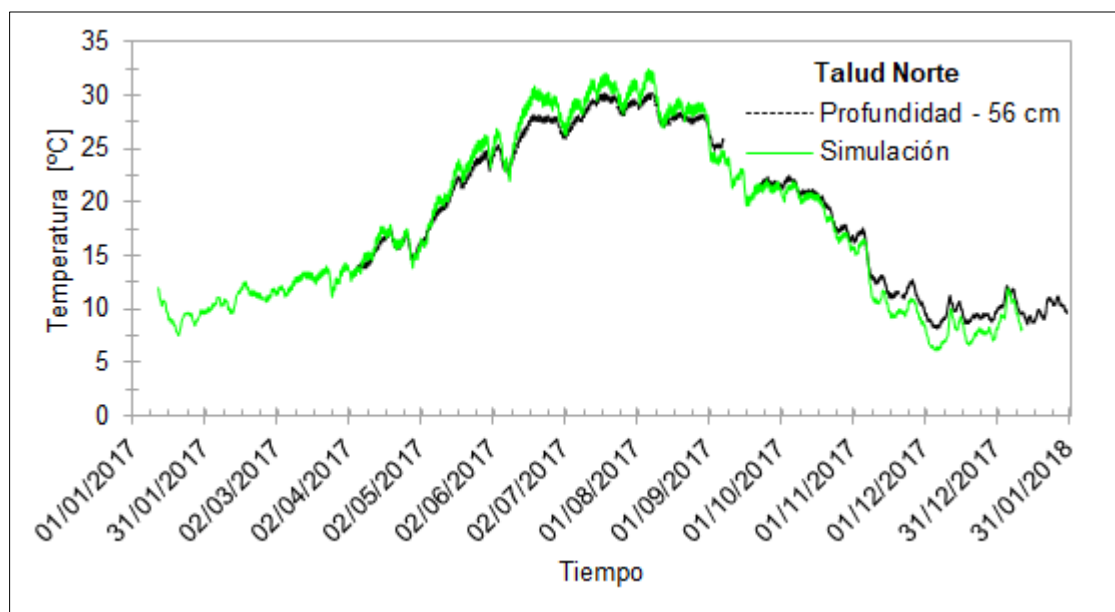
a)



b)

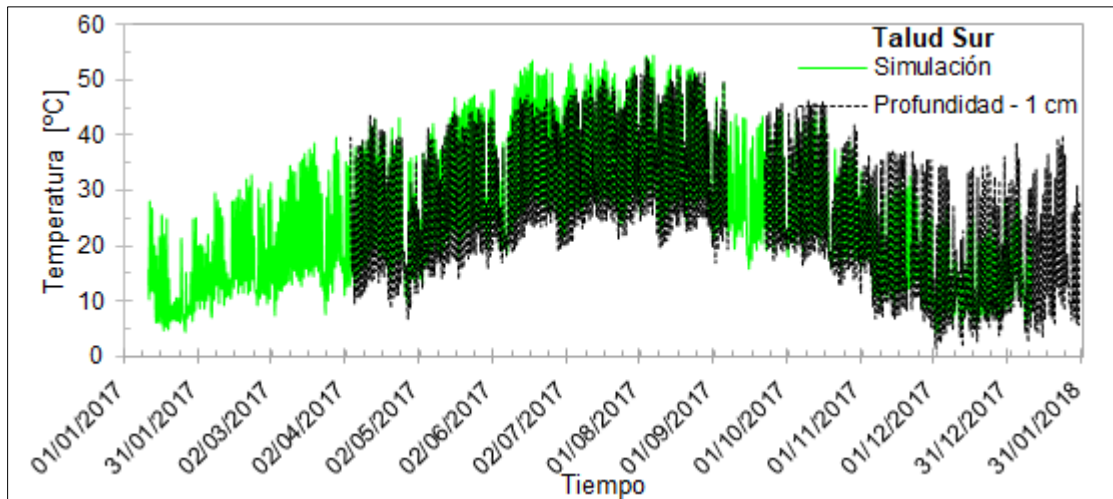


c)

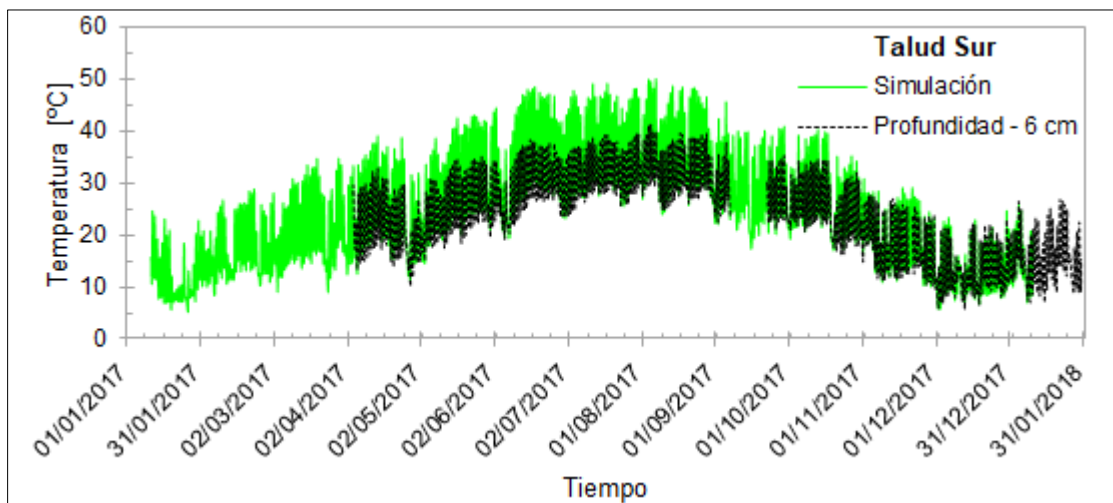


d)

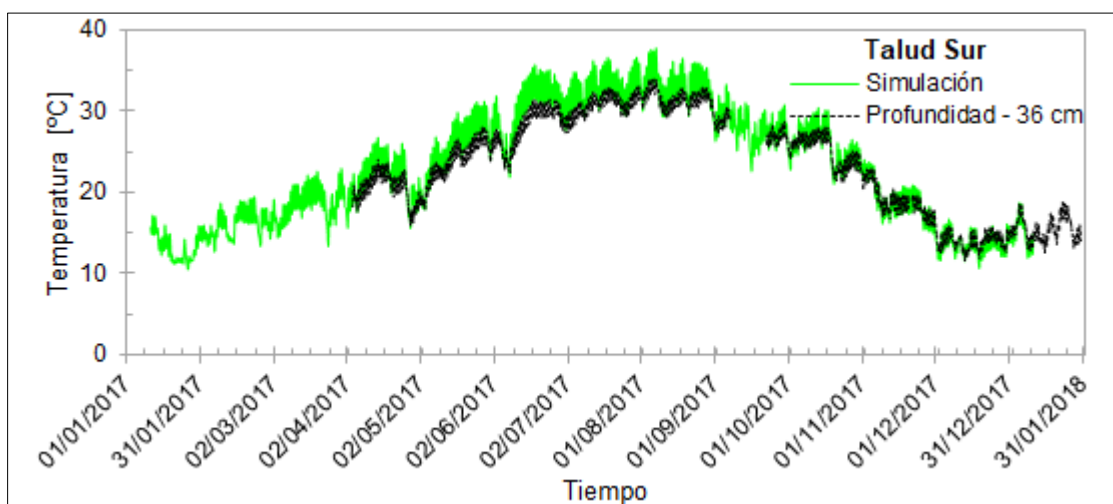
Figura 57. Comparación entre la temperatura del suelo simulada y observada en el talud norte durante un año **a)** – 1 cm, **b)** – 6 cm, **c)** – 36 cm, y **d)** – 56 cm de profundidad.



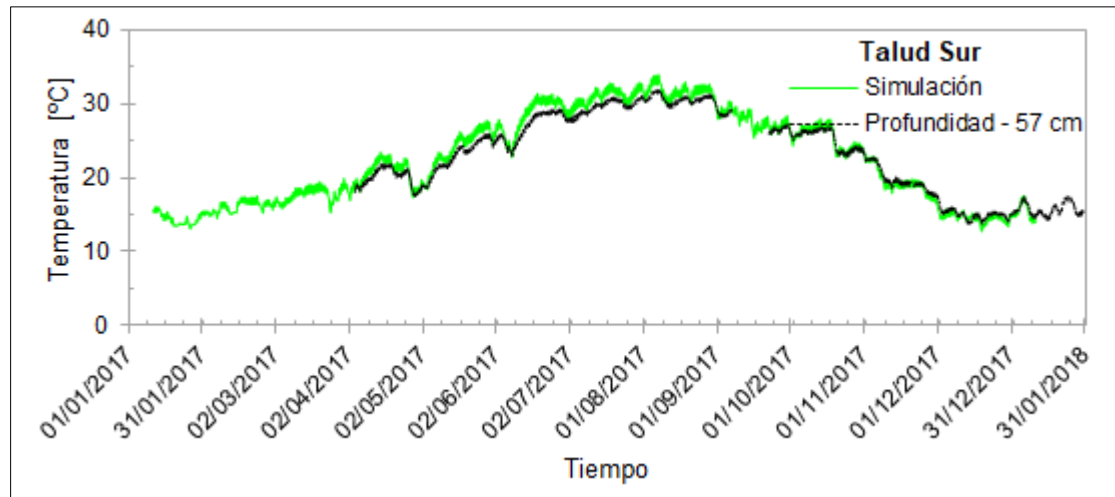
a)



b)



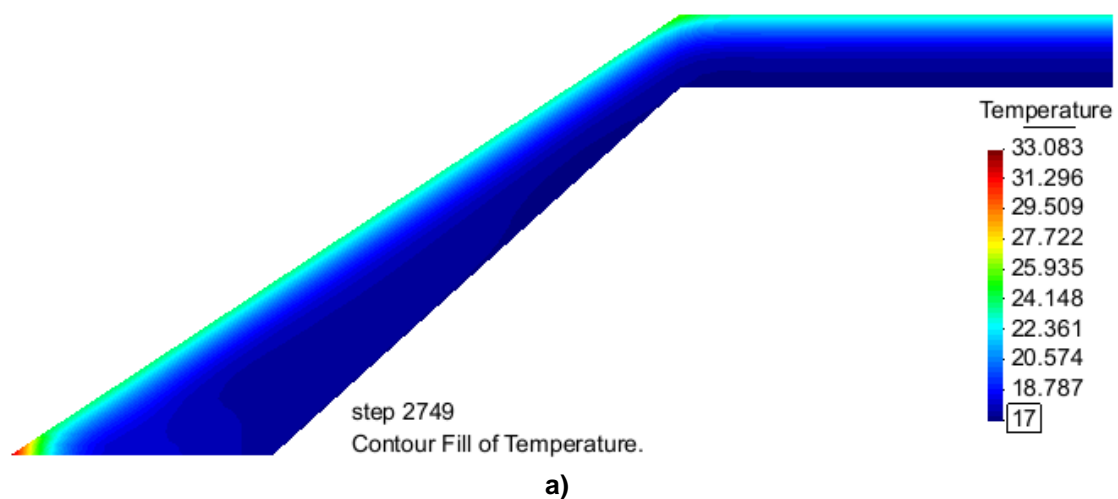
c)



d)

Figura 58. Comparación entre la temperatura del suelo simulada y observada en el talud sur durante un año **a)** - 1 cm, **b)** - 6 cm, **c)** - 36 cm, y **d)** - 57 cm de profundidad.

Es lógico que el talud sur al recibir directamente mayor cantidad de radiación presente temperaturas más elevadas con mayor oscilación especialmente en los primeros 6 cm de profundidad tanto en los datos registrados por los sensores como la que se obtiene del programa Code_Bright. Cabe indicar que para resolver el problema TH se ha definido una malla de elementos finitos estructurada concentrando los elementos en el perfil exterior de cada talud para obtener en detalle la variación de la temperatura del suelo en profundidad. En la Figura 59 se presenta la variación de la temperatura del suelo el día 05 de mayo de 2017 a las 14h00. Donde se observa que en los primeros centímetros se producen mayores cambios y que en profundidad la temperatura tiende a ser constante.



a)

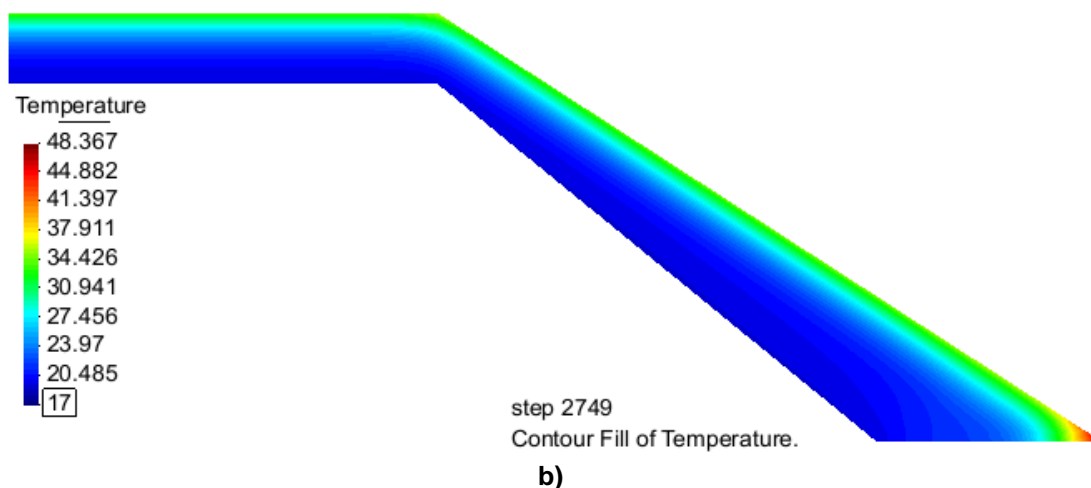
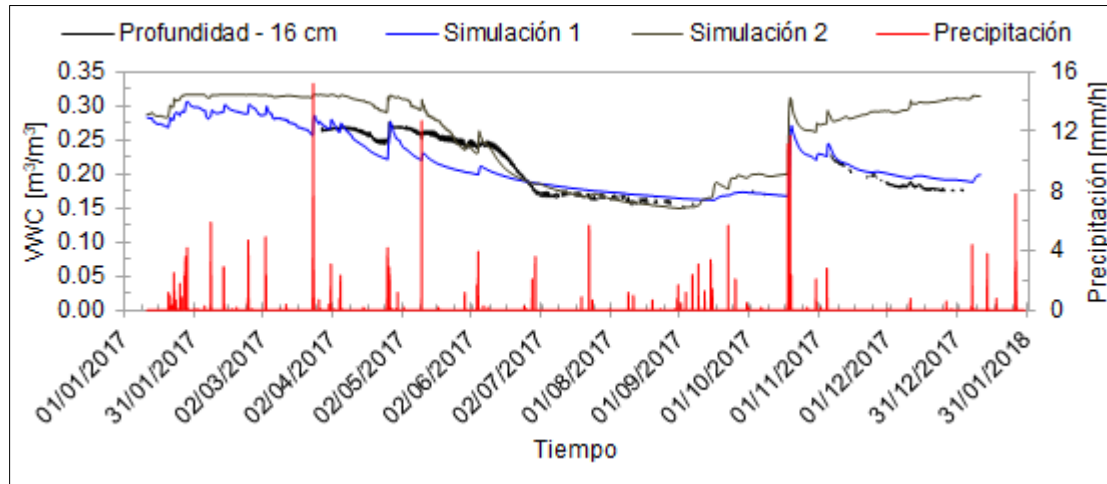


Figura 59. Temperatura del suelo **a)** Talud Norte **b)** Talud Sur el 05 de mayo de 2017 a las 14h00.

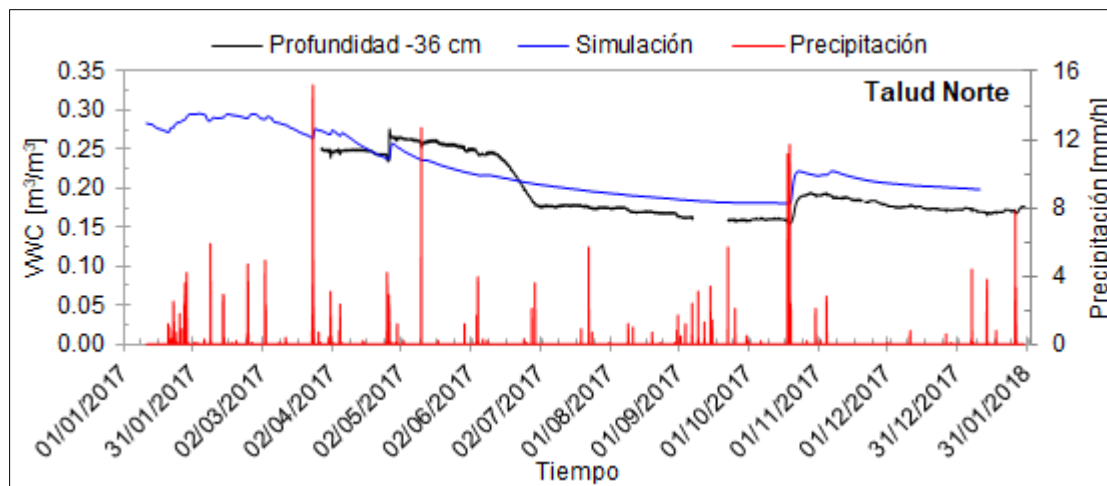
5.2 Contenido volumétrico de agua

En la Figura 60 se presenta el contenido volumétrico de agua (VWC) obtenido de la modelación en Code_Bright (Simulación 1) que corresponde a la ubicación de los sensores 5TE del área no vegetada para el talud norte y la precipitación registrada en la estación meteorológica Viladecans que permite observar de manera más clara los cambios bruscos (pico) cuando se registra precipitaciones. Los resultados del modelo indican que los valores de VWC en el mes de marzo de 2017 cuando se instaló los sensores coinciden en aproximadamente $0,25 \text{ m}^3/\text{m}^3$, esto equivale a decir que la hipótesis planteada como condición inicial a partir del (11/01/2017) cuando se construyó el terraplén es correcta. Al supervisar la construcción del terraplén se puede estimar el contenido de humedad de compactación que es un dato de entrada en el modelo para llegar al equilibrio y representar de manera correcta los registros de los sensores en el mes de marzo cuando inicia el monitoreo. Conforme pasan los días de acuerdo a los datos registrados por los sensores a -16 y -36 cm se inicia un secado con un gradiente similar, pero a mayor profundidad tiende a ser constante debido al confinamiento que se espera a esta profundidad (-56 cm). Así hasta el mes de julio del mismo año los sensores registran un valor promedio de $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ que el modelo no logra representar. El secado que registran los sensores en este periodo hasta el mes de julio se espera que se deba al cambio de volumen que experimenta toda estructura después de su construcción. Por el efecto de procesos de consolidación y/o colapsos. Al no incluir la parte mecánica al modelo no se puede representar esta diferencia en la pendiente de la etapa de secado. Los procesos de consolidación y/o colapsos que el suelo experimenta después de la construcción del terraplén hacen que haya un cambio en su estado inicial. En enero de 2018 las pendientes tanto del modelo como los sensores son paralelas y muy similares para el primer periodo de secado en el mes de marzo a junio de 2017 especialmente a -16 cm de profundidad, a mayor profundidad sucede para los cambios de VWC relativos donde el modelo representa los ciclos de mojado y secado que se presentan más adelante.

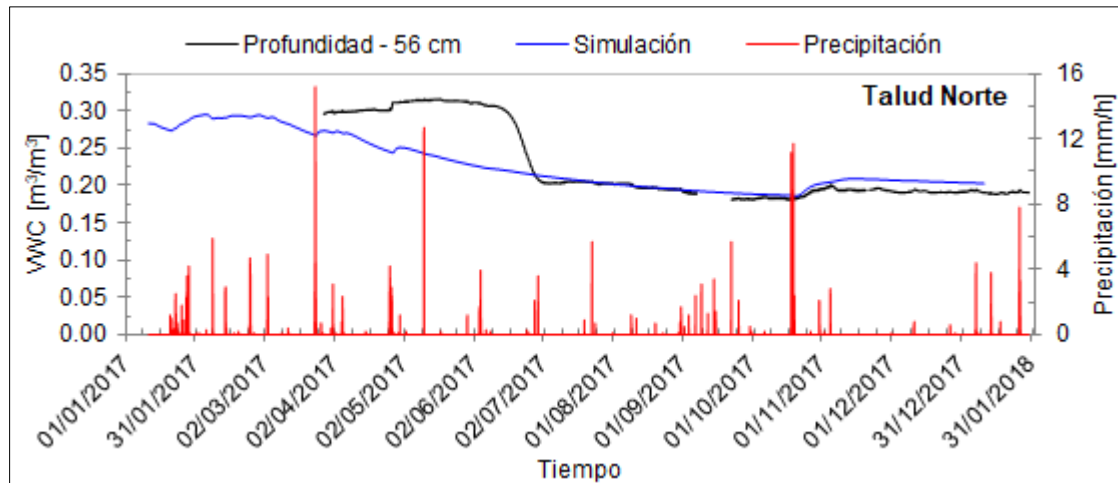
La simulación 2 de la Figura 60 a) representa el contenido volumétrico de agua sin considerar la radiación difusiva descrita en el apartado 4.1.3. En los meses cuando a la cara norte del terraplén no le llega directamente la radiación solar el suelo tiende a saturarse contrario a lo que los sensores registran.



a)



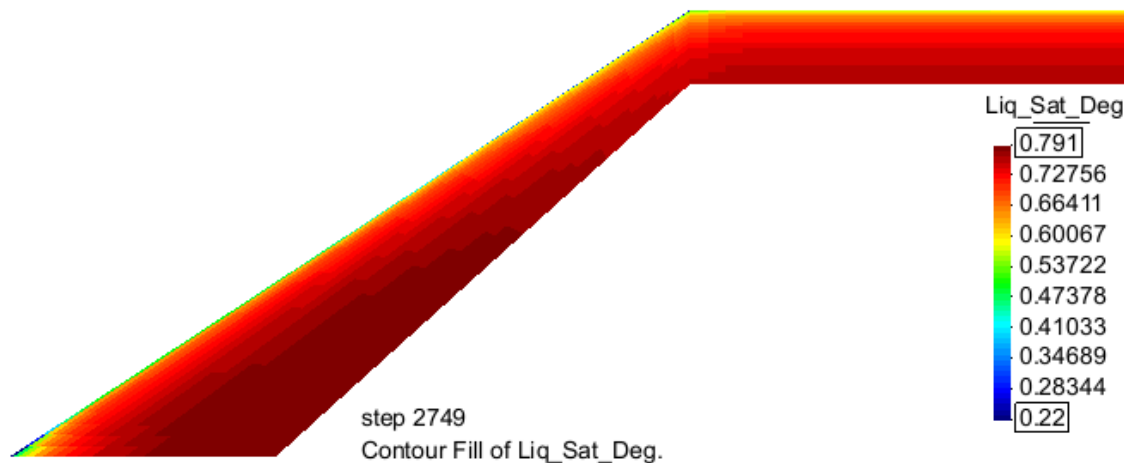
b)



c)

Figura 60. Comparación entre el contenido volumétrico de agua simulado y observado en el talud norte durante un año **a)** VWC -16 cm, **b)** VWC -36 cm y **c)** VWC -56 cm de profundidad y la precipitación observada de la estación meteorológica Viladecans.

El post proceso de Gid permite representar los cambios de grado de saturación de todo el perfil (ver Figura 61) talud norte y sur el día 05 de mayo de 2017 a las 14h00, donde se observa claramente que el perfil interno del talud norte contiene mayor humedad que el talud sur. En ambos perfiles el proceso de pérdida de humedad (secado) se da a lo largo de todo el perfil y en mayor cantidad al pie del talud.



a)

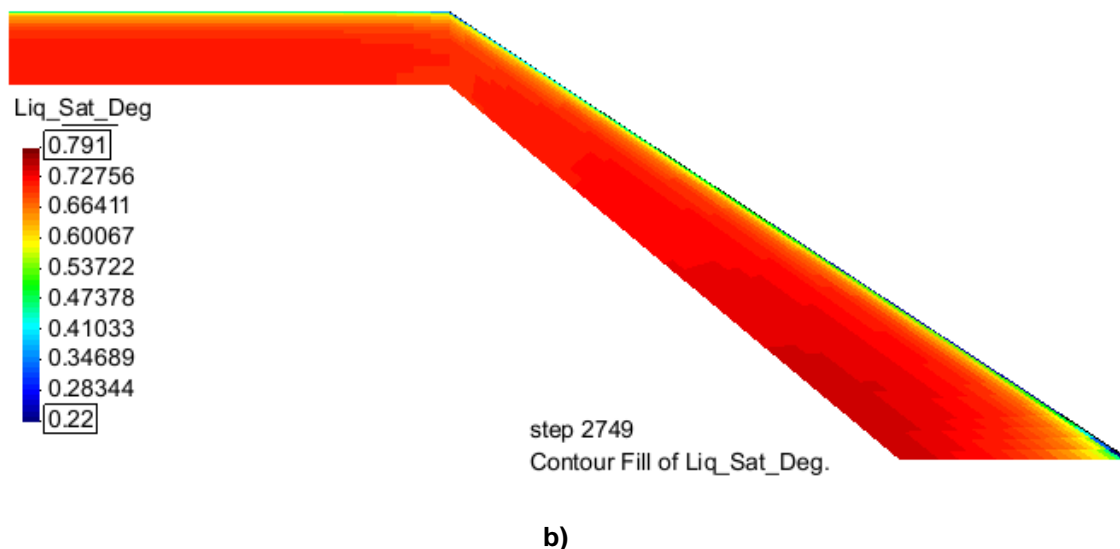
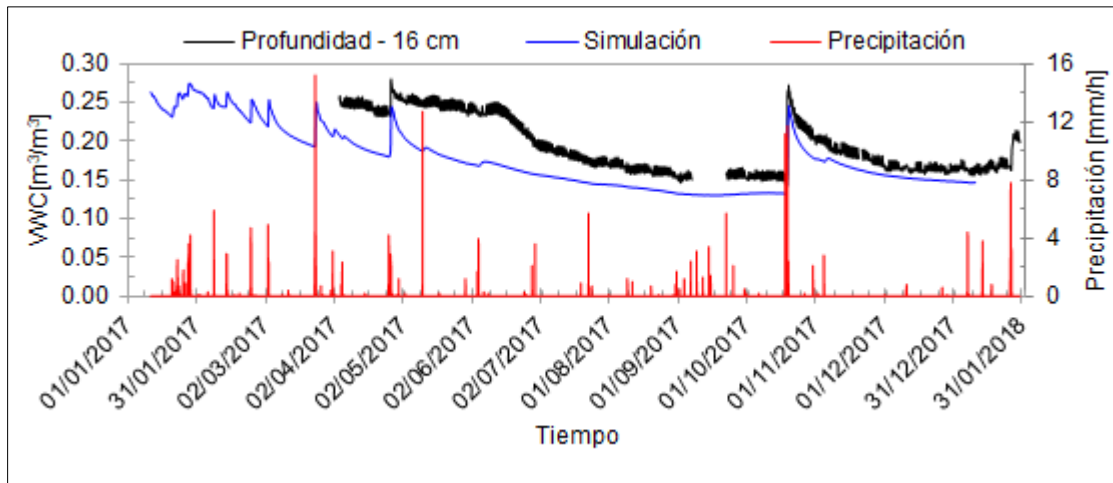
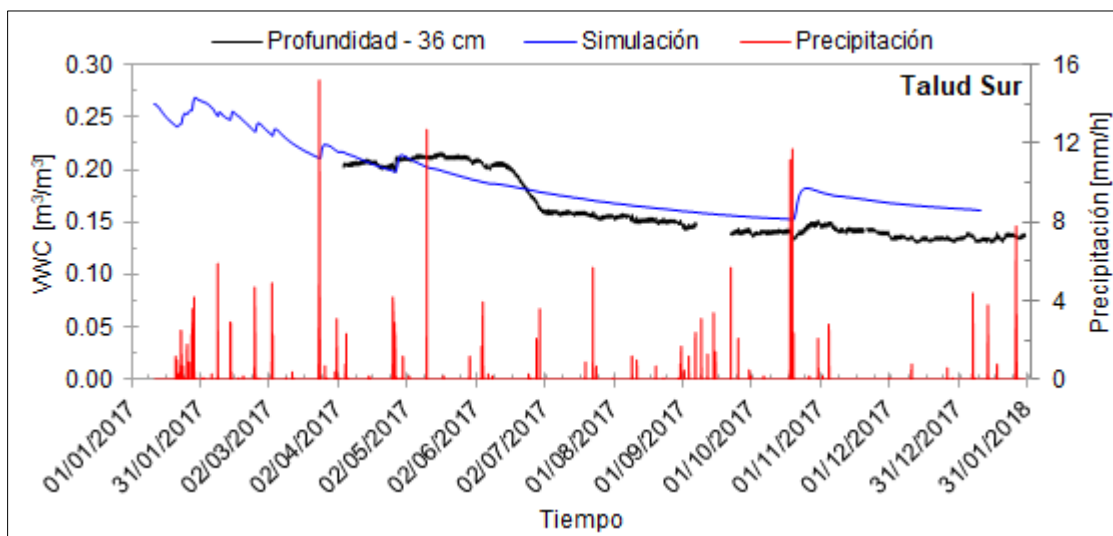


Figura 61. Simulación numérica del contenido volumétrico de agua mediante Code_Bright a) Talud Norte **b)** Talud Sur el 05 de mayo de 2017 a las 14h00.

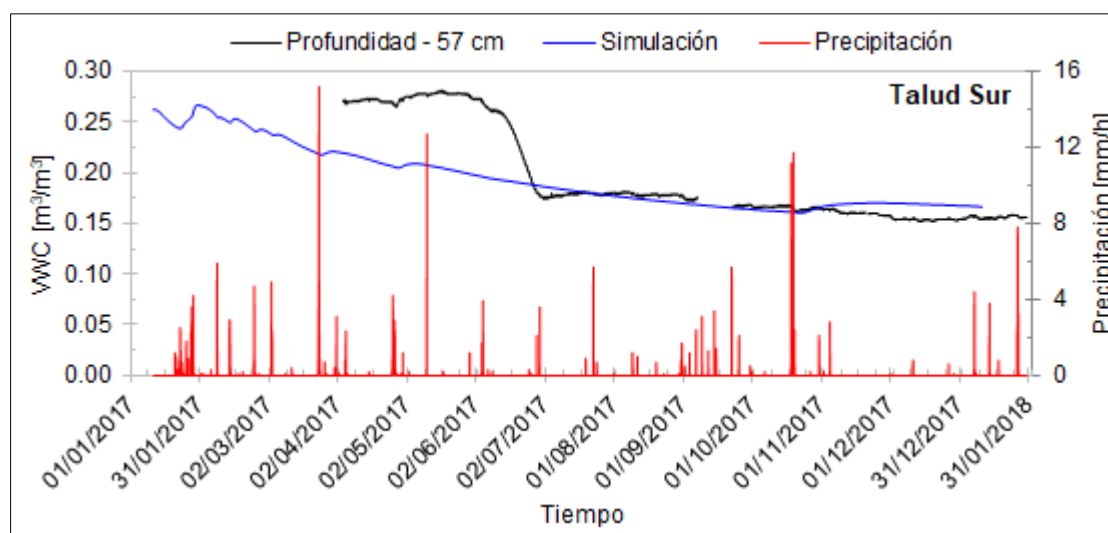
El comportamiento del suelo en el talud sur de la Figura 62 corresponde al comportamiento que se explica en el talud norte con la particular diferencia que el contenido volumétrico de agua no disminuye con la profundidad, así el sensor ubicado a -36cm de profundidad tiene menor VWC que la capa de suelo superficial (-16cm) que interactúa directamente con la atmósfera y la radiación llega directamente a esta cara. Los resultados obtenidos con el programa Code_Bright presentan una tendencia similar a lo que se registra con los sensores 5TE si se analiza únicamente los cambios relativos de VWC a partir del mes de agosto de 2017. En los primeros meses de marzo a agosto el VWC es menor que el talud norte llegando a un valor máximo de $0,28 \text{ m}^3/\text{m}^3$ registrado por el sensor a mayor profundidad (-57cm). Esto implica que el suelo pierde humedad más rápido debido a que la radiación llega directamente a la cara del talud como se indica en la Figura 56, esto a su vez provoca que el suelo experimente procesos de retracción y quede expuesto a posibles comportamientos de colapsos cuando se sature debido a las precipitaciones. El modelo, al no considerar la parte mecánica no se puede reproducir este comportamiento.



a)



b)

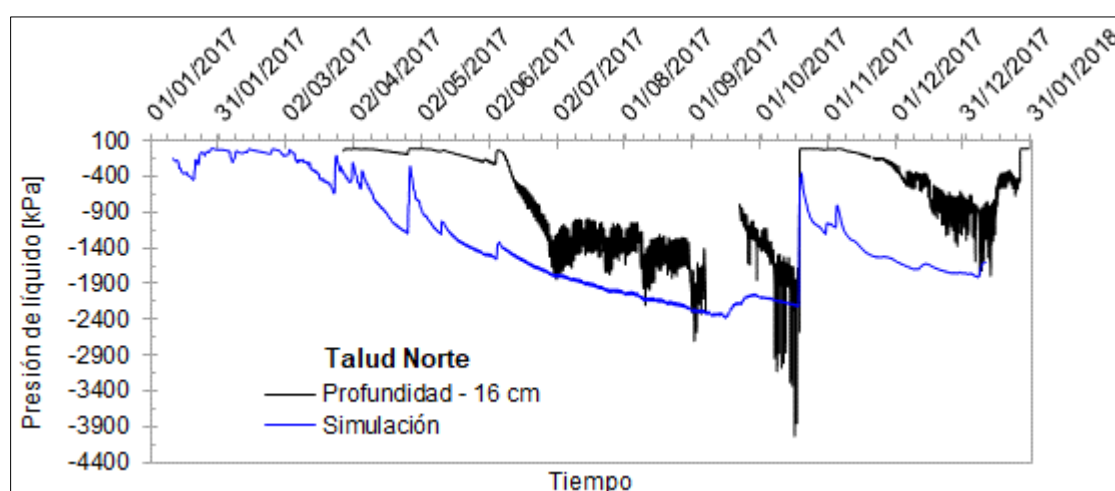


c)

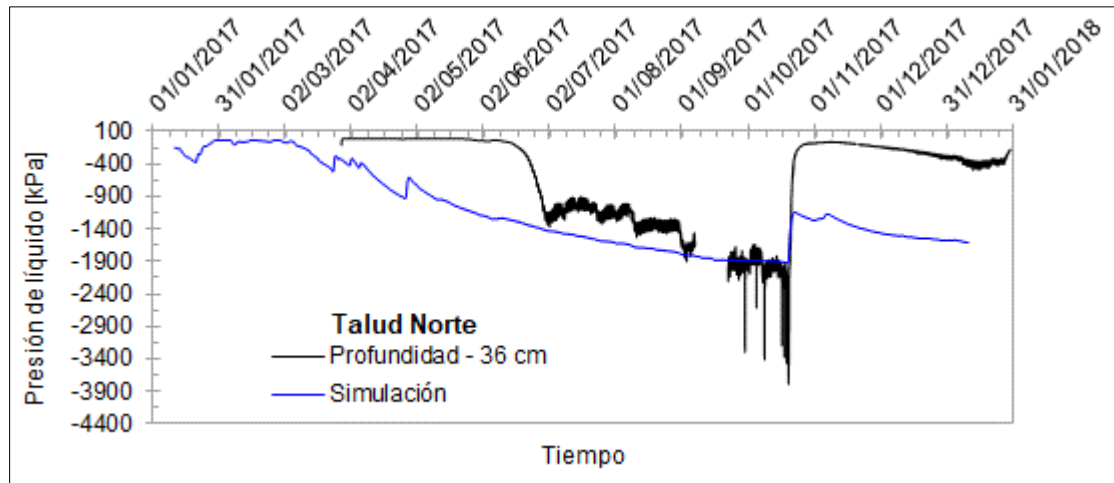
Figura 62. Comparación entre el contenido volumétrico de agua simulado y observado en el talud sur durante un año a) VWC -16 cm, b) VWC -36 cm y c) VWC -57 cm y la precipitación observada en la estación meteorológica Viladecans.

5.3 Presión de líquido

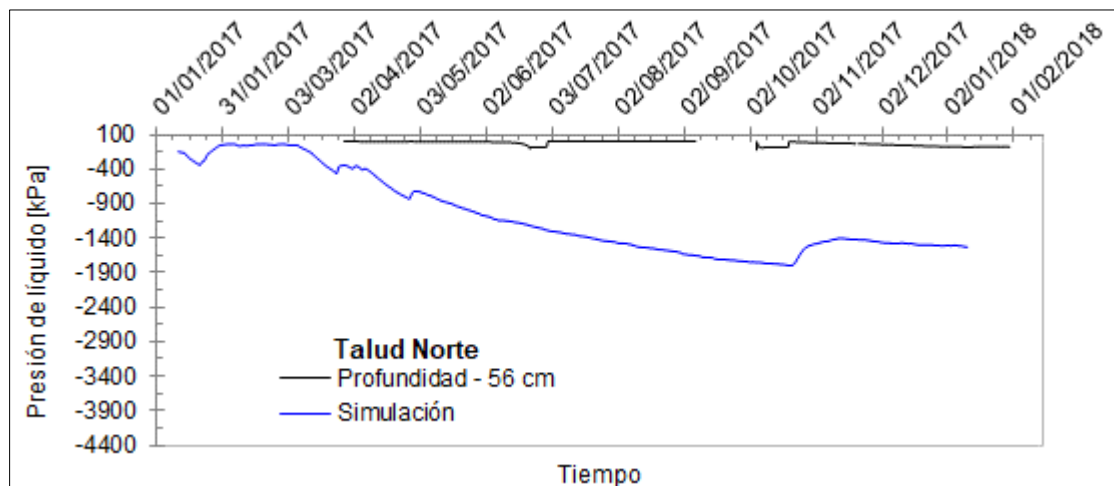
La Figura 63 presenta los resultados de la modelación realizada en el talud norte y los datos que registra el sensor MPS 6 (succión) a distintas profundidades. En cada profundidad hay diferencia entre los valores de presión de líquido simulados y valores medidos in situ que probablemente sea por el hecho de considerar una porosidad constante y el fenómeno de histéresis que el suelo experimenta (ver Figura 43) descrito por la curva de retención, donde para un grado de saturación existen dos valores de presión de líquido dependiendo de la trayectoria (secado y/o mojado).



a)



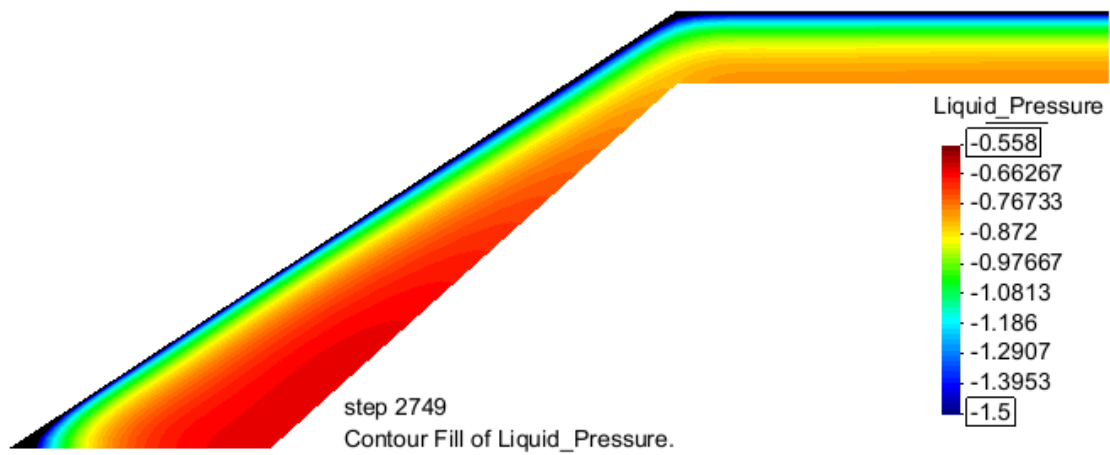
b)



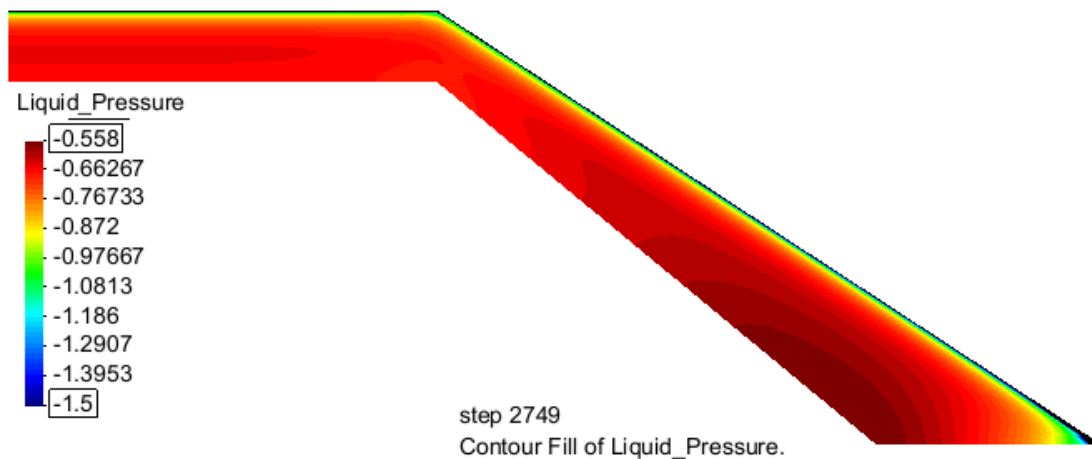
c)

Figura 63. Comparación entre la presión de líquido simulada y observado en el talud norte durante un año **a)** -16 cm, **b)** -36 cm y **c)** -56 cm de profundidad.

Para visualizar como se distribuye la presión de líquido en cada talud se grafica mediante el post proceso de Gid el día 05 de mayo de 2017 a las 14h00 en la Figura 64, donde se observa que en este instante la presión de líquido está por debajo de -644 kPa, para el talud norte y -597 kPa en el lado sur y en el pie del talud del perfil exterior la succión es un poco más elevada, lo que corresponde a la disminución del grado de saturación de la Figura 61.



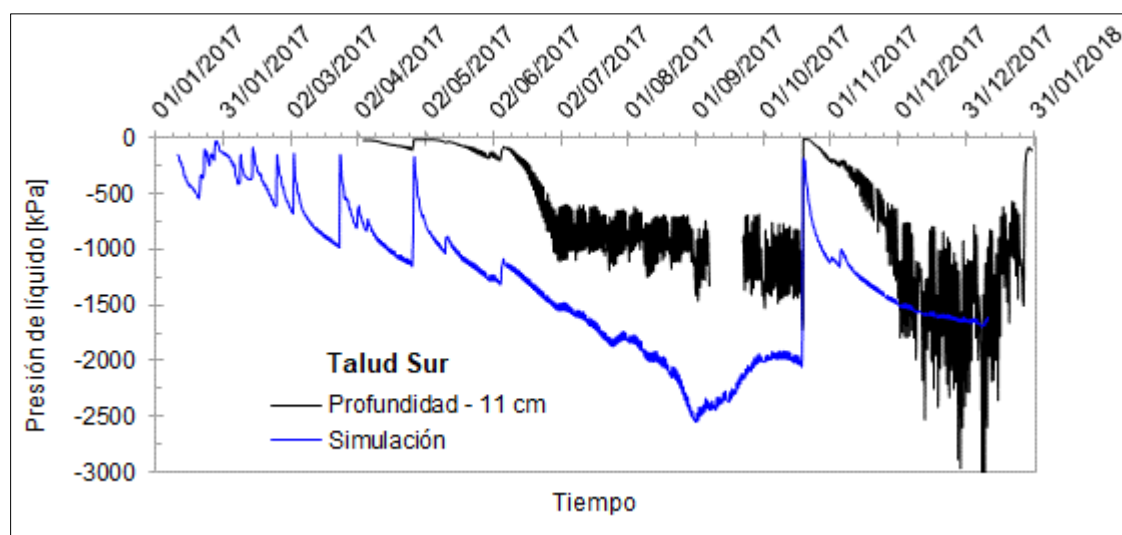
a)



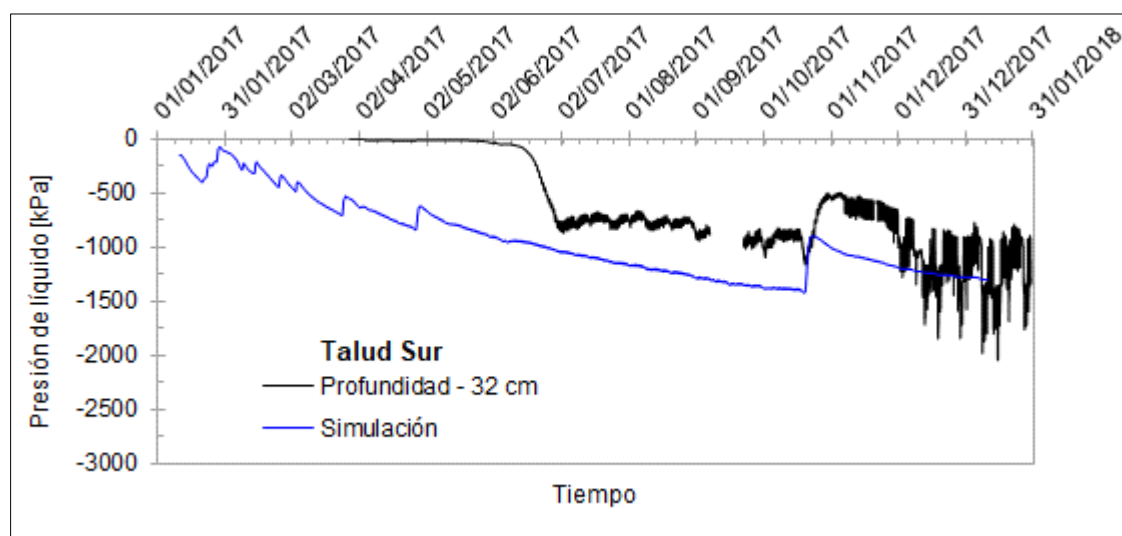
b)

Figura 64. Simulación numérica de la presión de líquido (MPa) mediante Code_Bright
a) Talud Norte b) Talud Sur el 05 de mayo de 2017 a las 14h00.

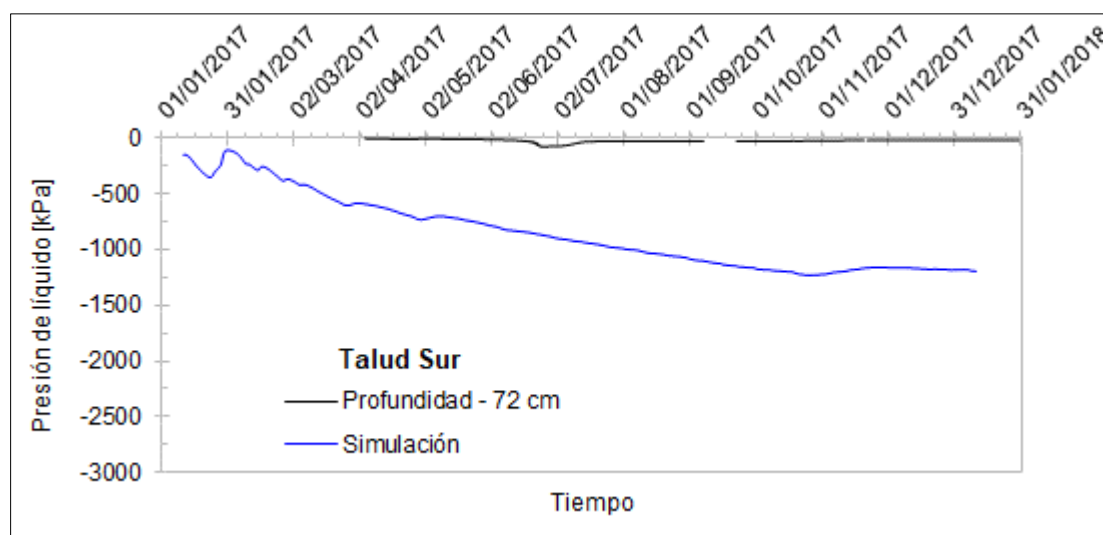
El modelo del talud sur de la Figura 65 representa un mayor secado desde el principio de la modelación a -11 y -32 cm de profundidad y sin datos comparables con el tensiómetro TP4 por problemas de desaturación. El secado que presenta el modelo es muy grande debido a que la cantidad de radiación que se aplica a la cara del talud llega directamente durante todo el año por la ubicación del talud (σ). Esta energía provoca que el suelo experimente cambios de retracción de mayor magnitud que el talud norte. Para modelar estos efectos sería necesario utilizar la parte mecánica del modelo que en el presente TFM no está considerada. Si se consideran los incrementos de presión de agua en relación a los valores del inicio de Julio de 2017, puede constatar que las variaciones de presión de agua medidas y calculadas se ajustan razonablemente bien.



a)



b)



c)

Figura 65. Comparación entre la presión de líquido simulada y observado en el talud sur durante un año a) -11 cm, b) -32 cm y c) -72 cm de profundidad.

5.4 Proceso de infiltración simulado

Para ilustrar la respuesta del suelo frente a un episodio de lluvias, se ha elegido el talud norte entre el 18 y 20 de octubre de 2017. En la Figura 66 se presenta para el periodo elegido, la gráfica de contenido volumétrico de agua a -16 cm de profundidad y la precipitación acumulada durante estos días, igual a 73,40 mm.

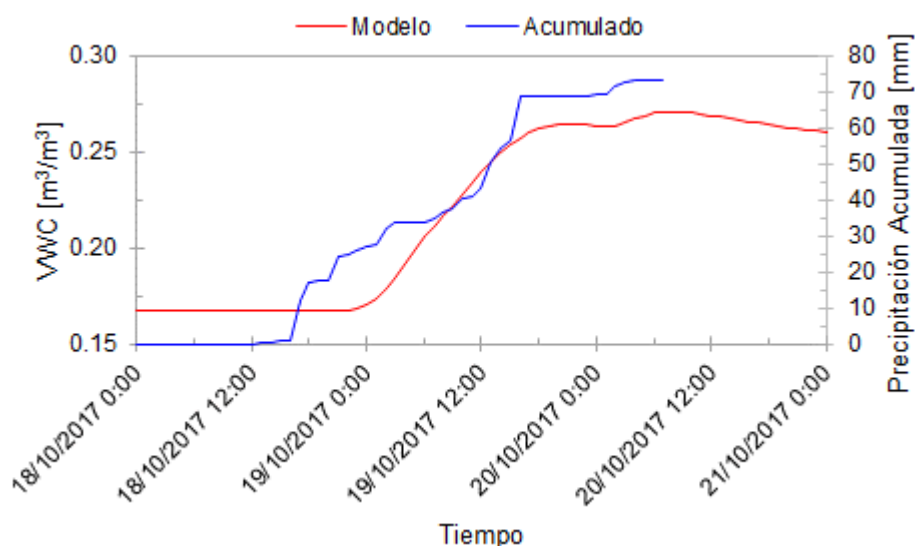
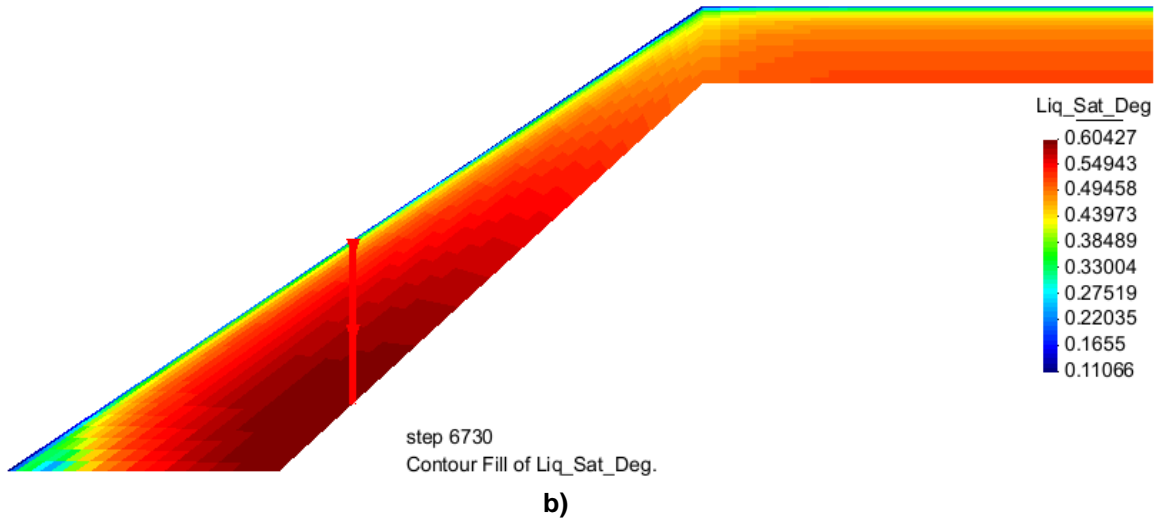
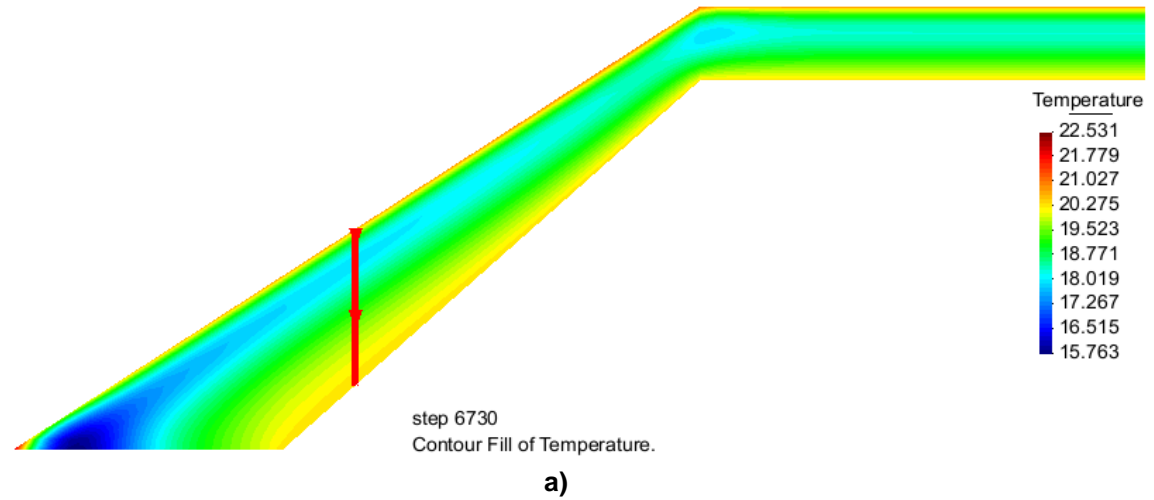


Figura 66. Simulación numérica de contenido volumétrico de agua (-16 cm) y precipitación acumulada del 18 al 20 de octubre de 2017 observada en la estación meteorológica Viladecans.

El proceso de infiltración se analiza partiendo de un VWC igual a $0,17 \text{ m}^3/\text{m}^3$ como estado inicial hasta valores de $0,27 \text{ m}^3/\text{m}^3$ cercanos a la saturación. En la Figura 67 se presentan el estado inicial de temperatura, VWC y presión de líquido obtenido a partir de Code Bright utilizando post proceso de Gid. En el anexo 4 se presenta cada paso de tiempo calculado por CB durante este intervalo.



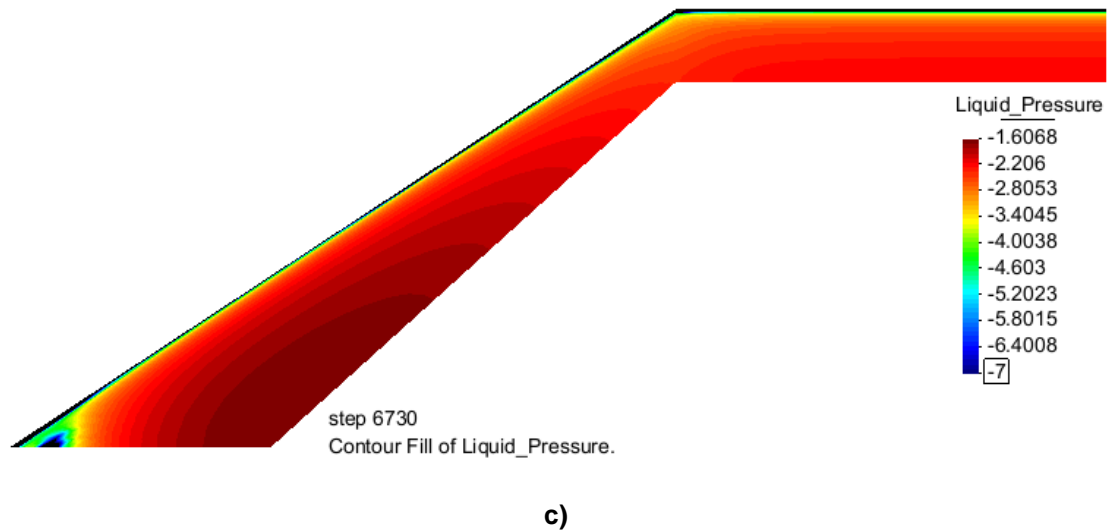


Figura 67. Resultados del modelo de **a)** Temperatura, **b)** VWC, **c)** Presión de líquido en el día 18/10/2017 11:00.

El perfil de temperatura del suelo de la Figura 68 durante el periodo de precipitación muestra que la temperatura disminuye conforme aumenta su intensidad pero los cambios que se producen son especialmente en superficie y varían en 4°C aproximadamente. Durante todo el periodo analizado la temperatura oscila entre 14 y 21°C especialmente en la zona de los primeros 0,30 m. Al finalizar la precipitación la temperatura del suelo empieza a aumentar desde la capa más superficial hacia la parte más profunda.

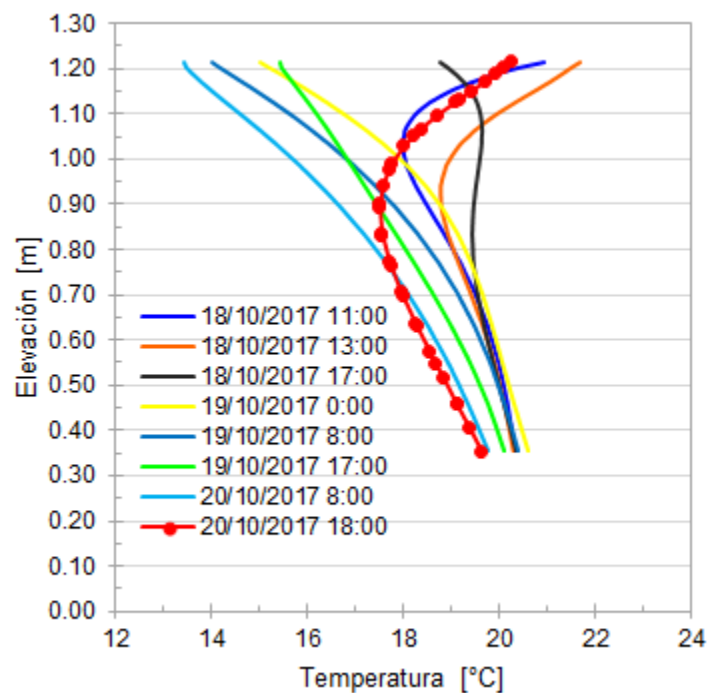


Figura 68. Perfil de temperatura del suelo simulado en el talud norte.

A partir del estado inicial (18/10/2017 11:00) el contenido volumétrico de agua se mantiene constante de acuerdo a la Figura 66 con un grado de saturación igual 0,54 a - 0,16 m de profundidad. Durante la etapa de precipitación la gráfica presenta un cambio brusco (pico) debido a la humectación (mojado) del suelo. De acuerdo a la Figura 69, la capa superficial que interactúa directamente con la atmósfera presenta valores muy bajos de grado de saturación igual a (0,20) especialmente en los primeros centímetros. Al iniciar la precipitación (18/10/2017 13:00) se observa un cambio brusco de contenido de humedad desde la superficie que aumenta conforme a la intensidad de la precipitación, cuando el agua se infiltra en el suelo el grado de saturación cambia en este periodo hasta la profundidad de 0,90 m. Al finalizar este proceso (mojado) se inicia un nuevo proceso de secado donde la capa superficial pierde humedad por evaporación debido al viento y/o el efecto de la radiación que son factores que hacen que el suelo pierda humedad y por ende su grado de saturación disminuya de forma gradual. Sin embargo, en la parte más profunda continua el proceso de infiltración que se relaciona con la permeabilidad del suelo.

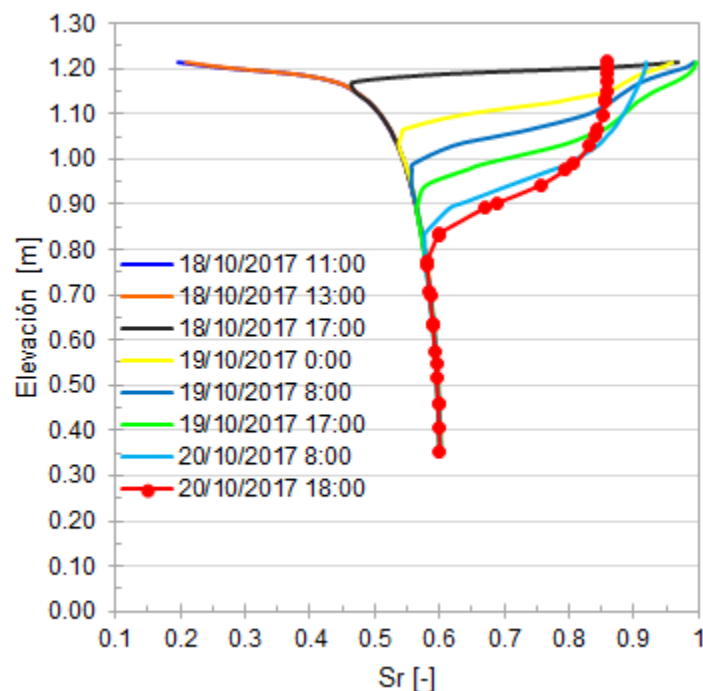


Figura 69. Perfil de grado de saturación simulado en el talud norte.

En la Figura 70 se presenta la presión de líquido en profundidad. La capa superficial experimenta cambios significativos frente a un proceso de mojado y conforme aumenta de la intensidad de la precipitación se llega a valores cercanos a la saturación donde la presión de líquido es nula

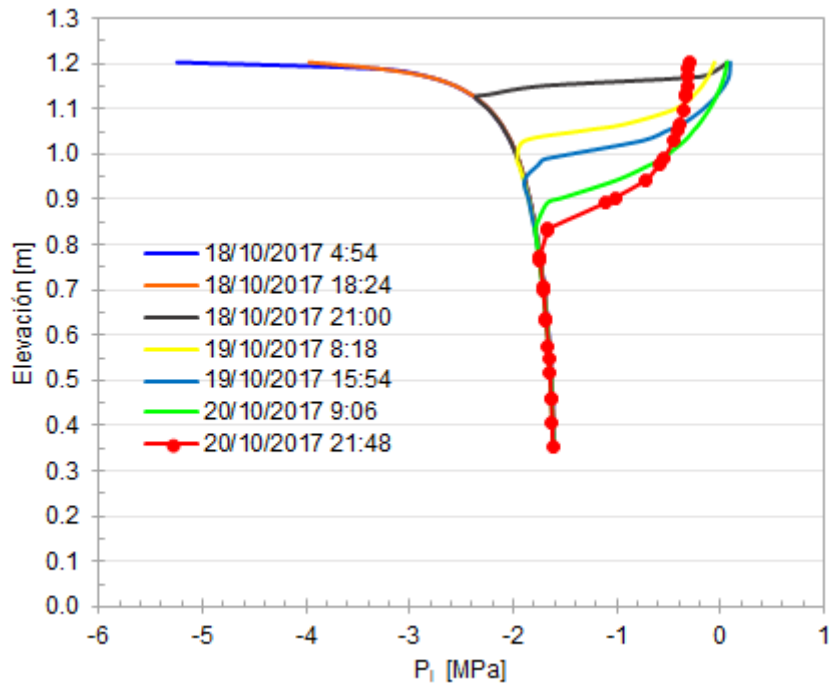


Figura 70. Perfil de presión de líquido simulado en el talud norte.

Para analizar la escorrentía, uno de los objetivos del presente TFM, se utiliza el post proceso de GID y los flujos que calcula el programa de elementos finitos Code_Bright. En el análisis se establecen como positivo [+] el flujo de entrada y negativo [-] el flujo de salida. El nodo 342 en superficie del talud norte se elige para el análisis que corresponde al eje donde están ubicados los instrumentos in situ.

La dirección del flujo absoluto por advección calculado a partir de la ley de Darcy se presenta en la Figura 71 previo a la etapa de precipitación (18/10/2017 11:00), donde se observa que la salida de flujo es por el pie del talud y el contorno.

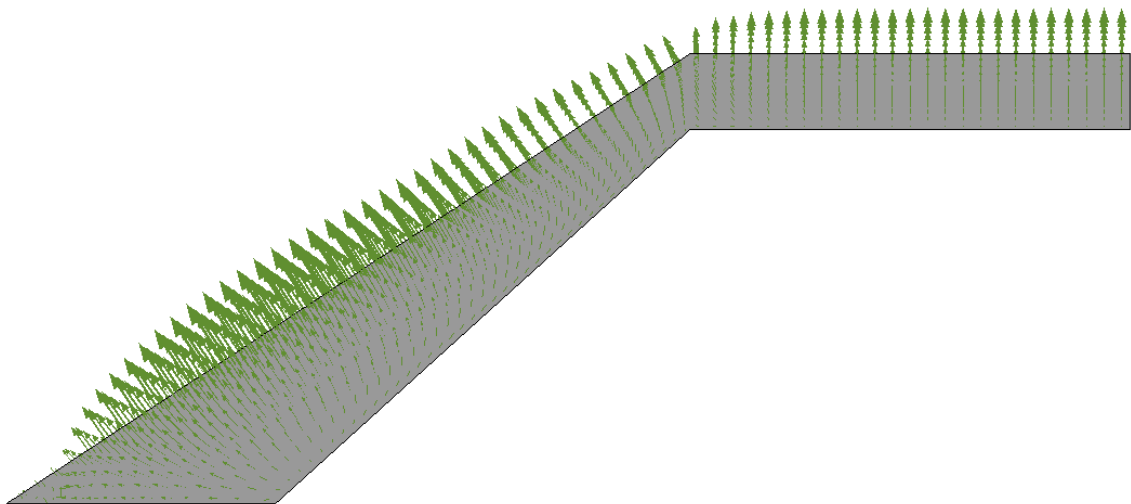


Figura 71. Dirección de flujo advectivo de agua antes del episodio de lluvia (18/10/2017 11:00).

En la Figura 72 se presenta el resultado de los flujos de precipitación y evaporación en el nodo elegido, como se puede observar inicialmente solo existe evaporación conforme aumenta la precipitación la evaporación disminuye.

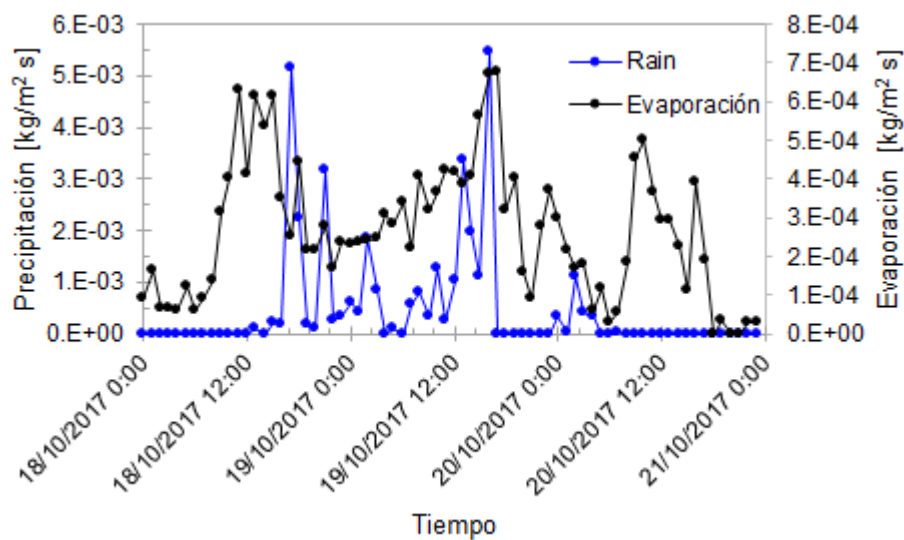


Figura 72. Flujo de precipitación y evaporación simulado en el talud norte durante el periodo de precipitación.

El flujo de escorrentía calculado a partir de Code_Bright se presenta en la Figura 73 conjuntamente con el flujo de precipitación donde se observa que para el valor de precipitación acumulada de 73,40 mm el flujo de escorrentía es nulo. Cabe indicar que Code_Bright considera escorrentía al flujo cuando la $P_i > P_g$ como se explica en la formulación del modelo del Anexo 1, pero de acuerdo a la literatura y los tipos de caudales que se indican en el apartado 3.3 el flujo subsuperficial que circula por la capa superior del suelo se considera como escorrentía subsuperficial debido a que es una capa de suelo de pocos centímetros y el agua circula hasta el pie del talud. Este flujo en Code_Bright no es considerado escorrentía pero mediante el post proceso se puede observar que la capa superficial es la que llega a la saturación como se indica en la Figura 67 b).

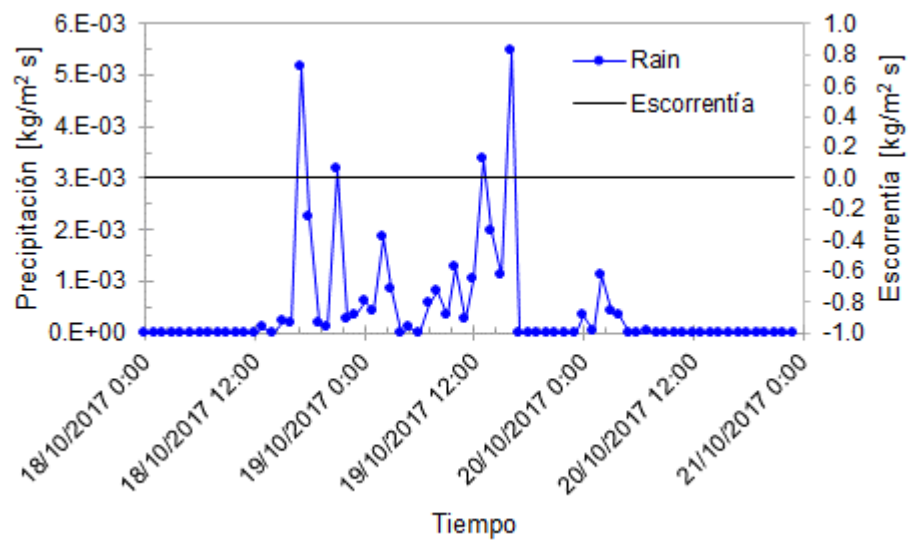


Figura 73. Flujo de precipitación y escoorrentia simulado en el talud norte etapa de precipitación.

6 Conclusiones y líneas de trabajo futuras

6.1 Conclusiones

Este TFM se enmarca entre las tareas a realizar en el paquete de trabajo del proyecto SMuCPHy relativo a la realización de un experimento a escala real que sirva para observar el comportamiento del suelo en taludes con y sin vegetación frente a los cambios de condiciones ambientales. El experimento, debidamente instrumentado proporciona medidas de gran interés para la validación y calibración de los modelos numéricos (en especial Code_Bright).

Se han realizado ensayos de laboratorio para completar la información obtenida en los TFM de (Oorthuis 2016) y (Cevallos 2017). Las principales conclusiones de las tareas realizadas son las siguientes:

- Los ensayos edométricos indican que el suelo del terraplén es un suelo blando con un índice de compresión C_c del orden de 0,2.
- El suelo tiene una capacidad de colapso del 8 % para una carga aplicada de 100 kPa y del 0,7 % para una carga de 20 kPa. Hay que tener en cuenta que las tensiones de la zona instrumentada del talud están en el rango de 0 a 12 kPa.
- Las permeabilidades obtenidas indirectamente a partir de ensayos edométricos o directamente en ensayos triaxiales son menores a las obtenidas en trabajos anteriores por (Cevallos 2017). Para la porosidad esperable en el suelo (índice de poros del orden de 0,7) del talud la permeabilidad es del orden de 10^{-8} m/s.
- Los ensayos triaxiales en condiciones de saturación permiten obtener un ángulo de rozamiento interno del suelo de 35,3 grados.
- Los ensayos triaxiales no drenados indican un comportamiento del suelo contractante con incrementos de presión de agua durante la fase de corte. El parámetro A de Skempton en rotura es del orden de 0,95

Se ha ampliado la instrumentación del terraplén incluyendo nuevos sensores para la medida de variables atmosféricas y del estado del suelo. Ha sido especialmente relevante el diseño y colocación de un sistema de medida de la escorrentía superficial y del agua infiltrada que circula por encima de la lámina impermeable. La medida de la escorrentía se realiza mediante un sensor de ultrasonidos que mide la altura de la lámina de agua en un vertedero triangular. El proceso está controlado por un sistema Arduino que además almacena las medidas realizadas. La implementación de herramientas informáticas de acceso libre como Arduino permite rebajar los costes en relación a la instrumentación tradicional de forma muy importante. La recogida de agua de escorrentía es compatible con la medida de los sólidos arrastrados por la erosión de la superficie del terreno.

Los datos registrados durante el primer año de monitoreo son de buena calidad y el comportamiento de los sensores y del sistema de control ha sido satisfactorio. Algunas de las conclusiones más relevantes de las medidas son las siguientes:

- Hay una diferencia importante de temperaturas entre la cara Norte y la cara Sur del talud. En verano esta diferencia llega a valer 14 °C en un punto situado a una profundidad de 1 cm.
- Durante el año la temperatura en la superficie del talud varía entre 39 °C y -0,5 °C en el talud Norte y entre 54 °C y 1,4 °C en el talud Sur. A 50 cm de profundidad la temperatura varía entre 8 y 32 °C en el lado Norte y 14 y 32 °C en el lado Sur.
- Las oscilaciones diarias de temperatura en la superficie del talud son muy importantes (del orden de 10 a 15 °C). A una profundidad de unos 35 cm estas variaciones diarias son imperceptibles.
- La velocidad del viento es mayor en el talud Norte que en el talud Sur lo que puede favorecer el secado del suelo y contrarrestar el efecto de la menor insolación respecto al lado Sur.
- En general el contenido volumétrico de agua es ligeramente superior en el talud orientado al Norte.
- El contenido volumétrico de agua en general tiende a disminuir y los efectos de las lluvias sólo se manifiestan cuando se acumulan caudales importantes como los medidos el 18 de octubre de 2017.
- El contenido volumétrico de agua suele ser máximo en el contacto con la lámina impermeable. En el talud sur el valor mínimo de contenido volumétrico de agua puede estar en la zona intermedia de la capa de suelo debido a que la porosidad en esa zona sea más baja que en el resto de suelo.
- Las succiones de agua se han movido entre valores nulos o ligeramente positivos y valores máximos del orden de 3 MPa.
- Los tensiómetros han dejado de funcionar cuando las succiones han subido por encima de 80 kPa y ha sido necesaria su resaturación en laboratorio.
- La relación entre la succión y la humedad ha puesto de manifiesto claramente la existencia de histéresis en el ciclo de secado-humedecimiento.

La modelización de la interacción suelo-atmósfera en el área sin vegetación se ha realizado empleando el modelo numérico de elementos finitos Code_Bright para el acoplamiento de los procesos Termo-Hidráulico. De esta modelización se pueden derivar las siguientes conclusiones:

- A pesar de los aspectos que se mencionan más adelante la modelación realizada se juzga satisfactoria. Se han podido reproducir las pautas de comportamiento de los taludes en base a las condiciones de contorno ambientales y las propiedades del suelo compatibles con el tipo de suelo empleado en la construcción del terraplén.
- La radiación juega un papel fundamental en la distribución de temperaturas en el suelo y en la evaporación superficial. Además de la radiación solar directa, para obtener buenos resultados hay tener en cuenta la radiación solar difusa y la radiación solar reflejante del entorno. Para ello, ha sido necesario introducir modificaciones en el programa Code_Bright.
- Las variaciones de temperatura se han simulado de forma razonable, aunque las oscilaciones diarias calculadas superan ligeramente a las medidas.
- Las variaciones en el contenido volumétrico de agua siguen bien a las medidas salvo en el inicio del período de modelización (período de Abril a Junio del 2017) donde los valores medidos superan a los calculados.

- En general las succiones calculadas han resultado ser mayores que las medidas, aunque los incrementos y decrementos ocasionados por las lluvias y períodos de sequía son comparables a los que se han medido.
- Las discrepancias entre las medidas de succión y de contenido volumétrico de agua y los valores calculados para estas dos variables obedecen en una parte importante a que el modelo numérico no puede incorporar la histéresis en la curva de retención.

6.2 Líneas de trabajo futuras

El trabajo realizado ha puesto de manifiesto aspectos en los que debe profundizarse en el futuro, tanto en el ámbito de la experimentación de laboratorio e “in situ” como en la modelización numérica. Las líneas de trabajo que se proponen son las siguientes:

- Investigar en el laboratorio curvas de retención que incluyan trayectorias con ciclos de humedecimiento y secado.
- Realizar ensayos de corte directo con control de la succión, tanto con raíces como sin ellas.
- Obtener valores de la permeabilidad no saturada mediante ensayos de columna de infiltración.
- Analizar las medidas actualizadas hasta la actualidad, tanto de la zona con vegetación como de la zona sin vegetación, investigando el efecto de la vegetación en el contenido de agua y la succión del suelo.
- Estudiar el flujo de energía poniendo en uso sensores de radiación solar y de flujo de calor en el interior del suelo.
- Cambiar la condición de contorno utilizada para la temperatura en el borde impermeable por una modelización completa del terraplén que incluya el suelo por debajo de la lámina impermeable.
- Tratar de incluir en la modelización la variación de la curva de retención en trayectorias de secado/humedecimiento.
- Modelar el comportamiento Termo-Hidráulico en el área con vegetación, tratando de incluir el efecto de la misma.
- Completar la modelización THM introduciendo el comportamiento mecánico, tanto en los cambios de volumen asociados a los cambios de humedad del suelo como en los cambios de resistencia asociados a la succión.

Así mismo, para seguir con los trabajos del experimento en Agrópolis se deberá diseñar y planificar el sistema de riego artificial para tratar de llevar los taludes a rotura por efecto de la lluvia artificial.

Bibliografía

Allen, Richard G, Luis S Pereira, Dirk Raes, and Martin Smith. 1998. "Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements - FAO Irrigation and Drainage Paper 56." *FAO, Rome*.

Alonso, Eduardo, Núria Pinyol, and Alexander Puzrin. 2010. *Geomechanics of Failures*. Springer. New York.

An, Ni, Sahar Hemmati, and Yujun Cui. 2017. "Numerical Analysis of Soil Volumetric Water Content and Temperature Variations in an Embankment Due to Soil-Atmosphere Interaction." *Computers and Geotechnics* 83: 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.10.010>.

Apuntes de mecánica de suelos avanzada. 2017. "Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech." Barcelona.

Askarinejad, Amin, Francesca Casini, Patrick Bischof, Alexander Beck, and Sarah M Springman. 2012. "Rainfall Induced Instabilities: A Field Experiment on a Silty Sand Slope in Northern Switzerland." *RIVISTA ITALIANA DI GEOTECNICA* 3/12: 50–71.

Badescu, V. 2002. "3D Isotropic Approximation for Solar Diffuse Irradiance on Tilted Surfaces" 26 (2): 221–33. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(01\)00123-9](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(01)00123-9).

Blanco-Muriel, Manuel, Diego Alarcón-Padilla, Teodoro López-Moratalla, and Martín Lara-Coira. 2001. "Computing the Solar Vector." *Elsevier Science Ltd* 70 (5): 431–41. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00156-0).

Boland, John, Barbara Ridley, and Bruce Brown. 2007. "Models of Diffuse Solar Fraction." *Elsevier Science Ltd* 33: 193–219. https://doi.org/10.1007/978-3-540-77455-6_8.

Casini, Francesca, Jean Vaunat, Enrique Romero, and Augusto Desideri. 2012. "Consequences on Water Retention Properties of Double-Porosity Features in a Compacted Silt." *Acta Geotechnica* 7 (2): 139–50. <https://doi.org/10.1007/s11440-012-0159-6>.

Cevallos, Andres. 2017. "Construcción e Instrumentación de Un Terraplén Experimental Para El Estudio de La Interacción Atmósfera-Vegetación-Suelo." Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech.

Chen, Li, and Michael H. Young. 2006. "Green-Ampt Infiltration Model for Sloping Surfaces." *Water Resources Research* 42 (7): 1–9. <https://doi.org/10.1029/2005WR004468>.

Chow, Ven Te, David Maidment, and Larry Mays. 1994. *Hidrología Aplicada*. McGRAW-HILL.

Dandar, Enkhbayar, Maarten Saaltink, Jesús Carrera, and Buyankhishig Nemer. 2017. "A Surface Model for Water and Energy Balance in Cold Regions Accounting for Vapor Diffusion." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, no. January: 1–25. <https://doi.org/10.5194/hess-2016-659>.

Das, Braja. 1985. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Brooks/Cole Publishing. Cole Publi. California. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

Davis Instrument. n.d. "Anemometer for Weather Monitor or Wizard." https://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/7911_SS.pdf.

Departament d' Enginyeria del Terreny Cartografia i, Geofísica. 2017. "CODE _ BRIGHT User's Guide."

Elia, Gaetano, Federica Cotecchia, Giuseppe Pedone, Jean Vaunat, Philip Vardon, Carlos Pereira, Sarah Springman, et al. 2017. "Numerical Modelling of Slope–vegetation–atmosphere Interaction: An Overview." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 50 (3): 249–70. <https://doi.org/10.1144/qjgegh2016-079>.

Eugeniusz, Koda, and Osiński Piotr. 2018. "Site Investigation of an Industrial Landfill for the Purpose of a Remedial Works Project." *Geo-Chicago 2016*, Proceedings, , May. <https://doi.org/doi:10.1061/9780784480168.073>.

Hargreaves, George, and Richard Allen. 2003. "History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129 (1): 53–63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53)).

Hovius, Niels, Colin Stark, and Philip Allen. 1997. "Sediment Flux from a Mountain Belt Derived by Landsliding Mapping." *Geology* 25 (3): 231–34. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025<0231:SFFAMB>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0231:SFFAMB>2.3.CO;2).

Hukseflux Thermal Sensors, B V. n.d. "Hukseflux Thermal Sensors." https://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_brochure/HFP01_v1813.pdf.

Lloret, Antonio. 2017. "Guia de Ensayo Triaxial." Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech.

MAUSA. n.d. "Ficha Técnica - Canal Self 100." Barcelona. <http://www.mausa.es>.

Olivares, L., and L. Picarelli. 2003. "Shallow Flowslides Triggered by Intense Rainfalls on Natural Slopes Covered by Loose Unsaturated Pyroclastic Soils." *Géotechnique* 53 (2): 283–87. <https://doi.org/10.1680/geot.2003.53.2.283>.

Olivella, S., A. Gens, J. Carrera, and E.E. Alonso. 1996. "Numerical Formulation for a Simulator (CODE_BRIGHT) for the Coupled Analysis of Saline Media." *Engineering Computations* 13 (7): 87–112. <https://doi.org/10.1108/02644409610151575>.

Oña, J De, A Ferrer, and F Osorio. 2011. "Erosion and Vegetation Cover in Road Slopes Hydroseeded with Sewage Sludge." *Transportation Research* 16 (6): 465–68. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.04.002>.

Oorthuis, Raul. 2016. "Diseño de Un Experimento a Gran Escala Para Estudiar El Efecto de Las Interacciones Suelo-Vegetación- Atmósfera En Laderas." Universitat Politècnica de Catalunya - Barcelona Tech.

Rahardjo, H, E. C Leong, and R. B Rezaur. 2008. "Effect of Antecedent Rainfall on Pore-Water Pressure Distribution Characteristics in Residual Soil Slopes under Tropical Rainfall." *Hydrol. Process* 22 (November 2008): 506–23. <https://doi.org/10.1002/hyp>.

Sproul, Alistair B. 2007. "Derivation of the Solar Geometric Relationships Using Vector Analysis." *Elsevier Science Ltd* 32 (7): 1187–1205. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.05.001>.

Tang, A M, P N Hughes, T A Dijkstra, A Askarinejad, M. Brenčič, Y. J. Cui, J. J. Diez, et

al. 2018. "Atmosphere–vegetation–soil Interactions in a Climate Change Context; Impact of Changing Conditions on Engineered Transport Infrastructure Slopes in Europe." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, no. March: 2017–2103. <https://doi.org/10.1144/qjegh2017-103>.

Terzaghi, Karl, Ralph B Peck, and G Mesri. 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Third Edit. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.

Trautz, Andrew C., Tissa H. Illangasekare, Ignacio Rodriguez-Iturbe, Katharina Heck, and Rainer Helmig. 2017. "Development of an Experimental Approach to Study Coupled Soil-Plant-Atmosphere Processes Using Plant Analogs." *Water Resources Research* 53 (4): 3319–40. <https://doi.org/10.1002/2016WR019884>.

Wood, David. 1990. *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics*. Press Syndicate of the University of Cambridge.

Anexo 1 Formulación Termo- Hidro- Mecánica (THM)

(Olivella, Gens, Carreras, & Alonso, 1996) considera que en un medio poroso deben considerarse aspectos térmicos, hidráulicos, mecánicos y el acoplamiento entre ellos en todas las direcciones, así el problema se formula en múltifase y multiespecie. Las fases son tres: fase sólida (s): mineral, fase líquida (l): agua y aire disuelto: fase gas (g); mezcla de aire seco y vapor de agua y las especies son: sólido (-): el mineral coincide con la fase sólida, agua (w): como líquido o evaporado en la fase gas y aire (a): aire seco, como gas o disuelto en la fase líquida.

Notación

ϕ	Porosidad	b	Fuerzas másicas
ρ	Densidad	θ	Fracción másica
j	Flujo de masa total	$\theta\rho$	Contenido másico
i	Flujo no advectivo	E	Energía interna específica
q	Flujo advectivo	i_c	Conducción de calor
u	Desplazamientos del sólido	j_E	Flujo advectivo de energía
σ	Tensor de tensiones	Sl, Sg	Grado de saturación del líquido y del gas

Superíndices: w y a se refiere a agua y aire respectivamente.

Subíndices: s, l y g se refieren a la fase sólido, líquido y gas, respectivamente.

Por ejemplo la masa volumétrica del agua (especie) en la fase gaseosa es, el producto de la fracción de masa de esa especie (agua) (ω_g^w) y la densidad aparente de la fase (gas) (ρ_g), $\theta_g^w = \omega_g^w \cdot \rho_l$. Las ecuaciones que rigen el problema THM son: Ecuaciones de equilibrio, ecuaciones constitutivas, relaciones de equilibrio y restricciones de definición.

ECUACIONES DE EQUILIBRIO

Las ecuaciones de equilibrio establecen el balance de masa para cada especie agua (w), aire (a) y sólido (-) como:

Balance de masa de agua. - El agua está presente en las tres fases.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_l^w S_l \phi + \theta_g^w S_g \phi) + \Delta \cdot (j_l^w + j_g^w) = f^w \quad (48)$$

Donde f_w es un suministro de agua externo como fuentes o sumideros de agua por unidad de volumen total. La derivada material se obtiene:

$$\phi \frac{D_s(\theta_l^w S_l + \theta_g^w S_g)}{Dt} + (\theta_l^w S_l + \theta_g^w S_g) \frac{D_s \phi}{Dt} + ((\theta_l^w S_l + \theta_g^w S_g) \phi) \nabla \cdot \frac{du}{dt} + \nabla \cdot (j_l^w + j_g^w) = f_w \quad (49)$$

La finalidad es expresar estas ecuaciones en función de las variables de estado, lo que requiere que las variables dependientes se expresen en función de las incógnitas.

Balance de masa de aire. - El aire es el principal componente de la fase gaseosa y que también puede estar presente como aire disuelto en la fase líquida. En este balance no se permite aire en la fase sólida (es decir, $\theta_s^a = 0$).

$$\phi \frac{D_s(\theta_l^a S_l + \theta_g^a S_g)}{Dt} + (\theta_l^a S_l + \theta_g^a S_g) \frac{D_s \phi}{Dt} + ((\theta_l^a S_l + \theta_g^a S_g) \phi) \nabla \cdot \frac{du}{dt} + \nabla \cdot (\mathbf{j}_l^a + \mathbf{j}_g^a) = f^a \quad (50)$$

Balance de momento del medio. - El equilibrio de momento se reduce al equilibrio de tensiones.

$$\nabla \cdot \sigma + \mathbf{b} = 0 \quad (51)$$

Donde σ son las tensiones totales y \mathbf{b} las fuerzas de masa correspondientes.

Balance de energía interna del medio. - Se establece teniendo en cuenta la energía de cada fase (E_s , E_l , E_g):

$$\frac{\partial}{\partial t} (E_s \rho_s (1 - \phi) + E_l \rho_l S_l \phi + E_g \rho_g S_g \phi) + \nabla \cdot (\mathbf{i}_c + \mathbf{j}_{Es} + \mathbf{j}_{El} + \mathbf{j}_{Eg}) = f^E \quad (52)$$

Donde \mathbf{i}_c es el término de conducción de calor a través del medio poroso, \mathbf{j}_{Es} , \mathbf{j}_{El} , \mathbf{j}_{Eg} son flujos advectivos de calor causados por movimientos de masas, y f^E es el aporte de energía interna y externa. Este término contiene en particular la disipación de energía debida a la deformación del medio, pero esta última no se incluye en la mayoría de los casos por ser insignificante.

ECUACIONES CONSTITUTIVAS

Las ecuaciones constitutivas establecen la relación entre las variables independientes o incógnitas, u , T , P_l , P_g y las variables dependientes, que se reemplazan en las ecuaciones de balance para que queden en función de las incógnitas, estas ecuaciones son: La ley de Darcy (Ley constitutiva hidráulica, ley de Fick y ley constitutiva mecánica).

Ley de Darcy. - Se aplica para calcular los flujos advectivos de líquido (l) y gas (g) en forma generalizada se escribe.

$$q_\alpha = - \frac{\mathbf{k} k_{r\alpha}}{\mu_\alpha} (\nabla P_\alpha - \rho_\alpha \mathbf{g}) \quad [\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (53)$$

Donde α representa la fase líquida (l) o gas (g), \mathbf{k} permeabilidad intrínseca, $k_{r\alpha}$ es la permeabilidad relativa, μ_α es la viscosidad que debe ser calculada y \mathbf{g} es la gravedad. La permeabilidad intrínseca \mathbf{k} depende principalmente de la estructura de medio poroso, aplicando el modelo de Kozeny podemos obtener este parámetro que relaciona el tipo de medio y su porosidad.

$$k = k_o \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} \frac{(1 - \phi_o)^2}{\phi_o^3} \quad [\text{m}^2] \quad (54)$$

Donde ϕ_o es la porosidad de referencia y k_o es la permeabilidad intrínseca a la porosidad de referencia.

La permeabilidad relativa k_{rl} es una función derivada del modelo Van Genuchten (1980).

$$k_{rl} = \sqrt{S_e} \left(1 - (1 - S_e^{1/\lambda})^\lambda \right)^2 \quad (55)$$

Se puede utilizar una función alternativa para calcular la permeabilidad relativa líquida como una función de potencia generalizada del grado de saturación:

$$k_{rl} = AS_e^\lambda \quad (56)$$

La permeabilidad relativa para la fase gaseosa se calcula como:

$$\begin{aligned} k_{rg} &= 1 - k_{rl} \\ k_{rg} &= AS_e^\lambda \end{aligned} \quad (57)$$

Ley de Fick.- Se utiliza para modelar la difusión molecular de vapor en la fase gaseosa y el aire disuelto denominados flujos no advectivos:

$$i_\alpha^i = -(\phi \rho_\alpha S_\alpha \tau D_m^i I) \nabla \omega_\alpha^i \quad [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (58)$$

Donde la fase esta identificada por el subíndice α =líquido (l),y gas (g) y la especie por el superíndice i =aire (a),agua (w) dependiendo si la difusión es en el líquido (aire disuelto ω_α^i) o en el gas (vapor ω_α^i), τ tortuosidad, D_m^i coeficiente de difusión de la especie i en la fase α .

En caso del vapor en el aire la difusión molecular es:

$$D_m^{vap} = D \left(\frac{(273 + T)^n}{P_g} \right) \quad (59)$$

Donde $D = 5,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s/K}^{-n}\text{Pa}$ y $n=2.3$.

En caso de difusión molecular de sales y aire disuelto:

$$D_m = D \exp \left(\frac{-Q}{R(273 + T)} \right) \quad (60)$$

Donde $D = 1,1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $R = 8.314 \text{ J/mol K}$ y $Q = 24530 \text{ J/mol}$.

El flujo de masa de dispersión mecánica es también controlado por la ley de Fick.

$$\mathbf{i}_\alpha^i = -(\rho_\alpha \mathbf{D}'_\alpha) \nabla \omega_\alpha^i \quad [\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}] \quad (61)$$

Donde el tensor de dispersión mecánica se define como:

$$\mathbf{D}'_\alpha = d_t |\mathbf{q}_\alpha| \mathbf{I} + (d_l - d_t) \frac{\mathbf{q}_\alpha \mathbf{q}_\alpha^t}{|\mathbf{q}_\alpha|} \quad (62)$$

El flujo de calor de dispersión mecánica se calcula por medio de la ley de Fourier:

$$\mathbf{i}_h = -(C_\alpha \rho_\alpha \mathbf{D}'_\alpha) \nabla T \quad [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}] \quad (63)$$

Donde C_α es el calor específico de la fase α y el tensor de dispersión mecánica se define de la misma manera antes descrita, pero utilizando las dispersividades correspondientes para dispersión de calor. La dispersión de calor se añade a la conducción de calor.

Ley de Fourier.- Esta ley constitutiva termica rige la conducción de calor (flujo conductivo) mediante:

$$\mathbf{i}_c = -\lambda \nabla T \quad [\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}] \quad (64)$$

Dónde λ es la conductividad térmica del medio poroso. Este parámetro se establece como una media geométrica entre λ_{dry} y λ_{sat} , que relaciona el grado de saturación con la porosidad.

$$\begin{aligned} \lambda_{dry} &= \lambda_{solid}^{(1-\phi)} \lambda_{gas}^\phi \\ \lambda_{sat} &= \lambda_{solid}^{(1-\phi)} \lambda_{liq}^\phi \end{aligned} \quad (65)$$

Donde

$$\lambda_{solid} = (\lambda_{solid})_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3$$

Donde se ha incorporado una posible dependencia de la conductividad térmica sólida sobre la temperatura. La definición de conductividad térmica seca y saturada permite separar la dependencia de la porosidad y la dependencia del grado de saturación como:

$$\lambda = \lambda_{sat}^{sl} \lambda_{dry}^{1-sl} \quad (66)$$

Por otra parte, las conductividades térmicas secas y saturadas se pueden calcular como se ha descrito anteriormente o de manera experimental.

Curva de retención de agua – Doble porosidad.- Van Genuchten (1980) propone la curva de retención para estudiar el comportamiento de los suelos no saturados que relaciona la succión ($P_a - P$) con el grado de saturación.

En suelos granulares la distribución de poros es monomodal dominante porque existe poca tendencia de formar agregaciones pero a medida que aumenta la cantidad de finos

las partículas tienden a agruparse dependiendo de la cantidad de agua añadida donde se distingue dos rangos: macroporos y microporos según (Casini et al. 2012), los macroporos son en su mayoría los poros interagregados entre las agregaciones, mientras que los microporos son los poros intraagregados dentro de estas unidades elementales. La distribución del tamaño de poros se puede describir a partir de un modelo de retención multimodal considerando una superposición de dos curvas de retención (Van Genuchten).

$$\frac{e_w + e_{wres}}{e - e_{wres}} = \sum_{i=1}^k w_i \left[\frac{1}{1 + (\alpha_i s)^{n_i}} \right]^{m_i} \quad (67)$$

Donde e_w es la relación de agua ($S_r e$), k es el número de sub-curvas, w_i factor de ponderación para cada curva $0 < w_i < 1$, α_i , m_i , n_i son parámetros de cada sub curva. La implementación de este modelo permite obtener una curva de retención más detallada para comprender el comportamiento de los suelos no saturados a partir de:

$$S_e = \frac{S_l - S_{rl}}{S_{ls} - S_{rl}} = (1 - \omega) \left[1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P} \right)^{\frac{1}{1-\lambda_M}} \right]^{-\lambda_M} + \omega \left[1 + \left(\frac{P_g - P_l}{P_m} \right)^{\frac{1}{1-\lambda_m}} \right]^{-\lambda_m} \quad (68)$$

$$P = P_{0M} \frac{\sigma}{\sigma_m}, P_m = P_{0m} \frac{\sigma}{\sigma_m}$$

Donde w es el factor de peso para la micro estructura, P_{0m} , P_{0M} valores de entrada de aire para la micro y macro, respectivamente, λ_m , λ_M corresponde a la forma de la curva de retención para la micro y macro, respectivamente. S_l el grado de saturación, S_{ls} es el grado máximo de saturación y S_{rl} el grado de saturación residual. P_o , σ_o son parámetros del material medidos a una temperatura de 20°C.

Ley Constitutiva Mecánica. - El comportamiento de suelos saturados se estudia en términos de las tensiones efectivas establecido por Terzaghi.

$$\sigma' = \sigma - P_l \mathbf{m} \quad (69)$$

Donde \mathbf{m} es un vector auxiliar $[1, 1, 1, 0, 0, 0]$, en caso de suelos no saturados se considera variables independientes: la tensión neta ($\sigma - P_a \mathbf{m}$) y succión ($s = P_a - P_l$) donde la tensión neta es la diferencia entre la tensión total y la presión de aire y la ecuación constitutiva se escribe de forma incremental.

$$d\sigma = D d\varepsilon + h ds \quad (70)$$

Donde σ ahora es la tensión neta, ε es el tensor de deformaciones. D es la matriz de rigidez y h es un vector constitutivo relativo a los cambios de succión por cambios de la tensión neta.

Restricciones de equilibrio

Las restricciones de equilibrio se dan para la concentración de vapor de agua en gas y la concentración de aire disuelto en el agua mediante las siguientes ecuaciones:

Ley Psicrométrica. - Establece la masa de vapor de agua por unidad de volumen de gas (θ_g^w) en contacto con una superficie plana, fuertemente dependiente de la temperatura.

$$\theta_g^w = (\theta_g^w)^0 \exp\left(\frac{-(P_g - P_l)M_w}{R(273.15 + T)\rho_l}\right) \quad (71)$$

M_w es la masa molecular del agua (0,018 kg/mol), R es la constante del gas (8,314 J/mol K) y T es la temperatura (°C).

Ley de Henry. - Expresa el equilibrio del aire disuelto donde la fracción másica de aire disuelta en la fase líquida es proporcional a la presión de aire.

$$\omega_l^a = \frac{P_a M_a}{H M_w} \quad (72)$$

Donde ω_l^a es la fracción de masa de aire en el líquido, P_a es la presión parcial de aire. M_a es la masa molecular de aire (0,02895 Kg/mol), H es la constante de Henry (10000 MPa) y M_w es la masa molecular del agua.

Las ecuaciones para el balance de masa se establecieron siguiendo el enfoque de composición. Es decir, el balance de masa se realiza para el agua, el aire y las especies de sólido en lugar de utilizar fases sólidas, líquidas y gaseosas. Se establece una ecuación para el equilibrio de energía para el medio como un todo. La ecuación del equilibrio de momentum para el medio poroso se reduce a la del equilibrio de tensión.

Anexo 2 – Ensayo triaxial drenado – CD

Saturación

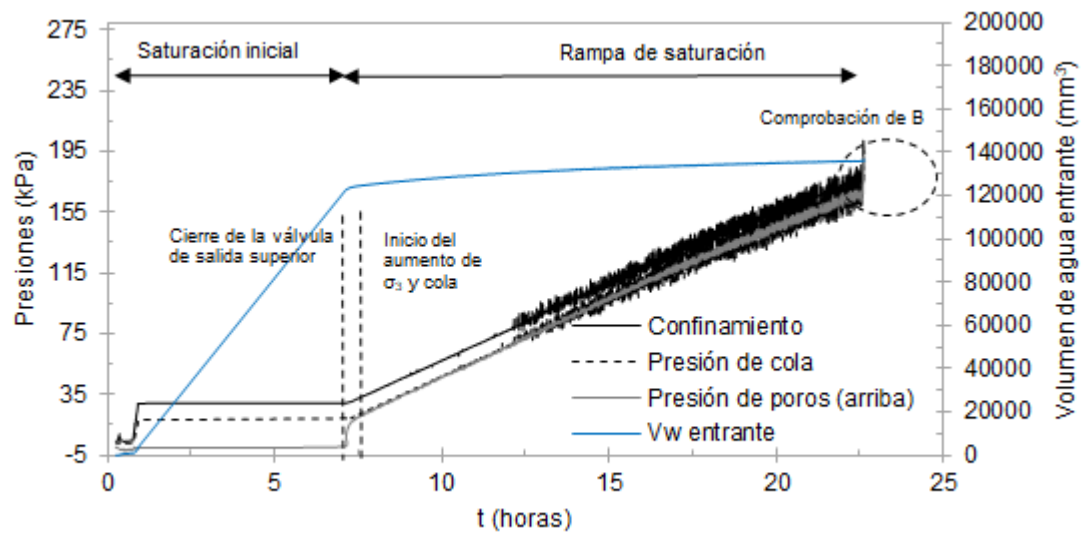


Figura 74. Etapa de saturación ensayo CD.

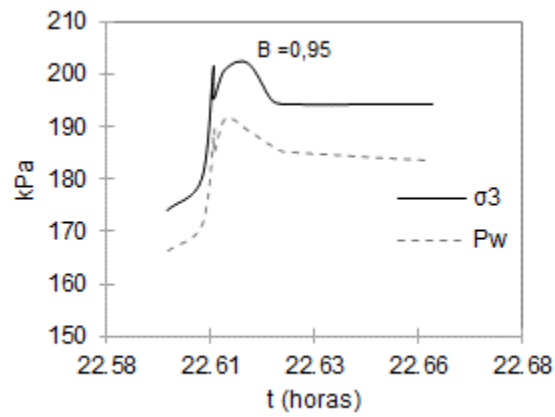
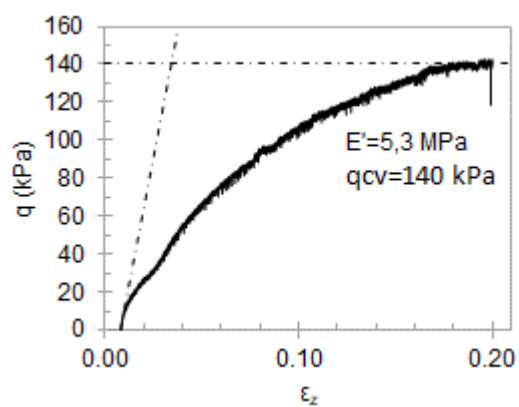
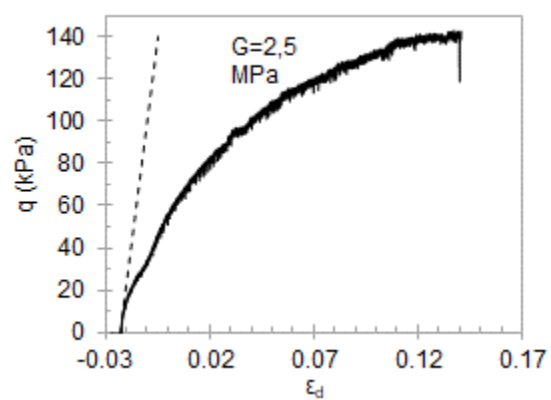


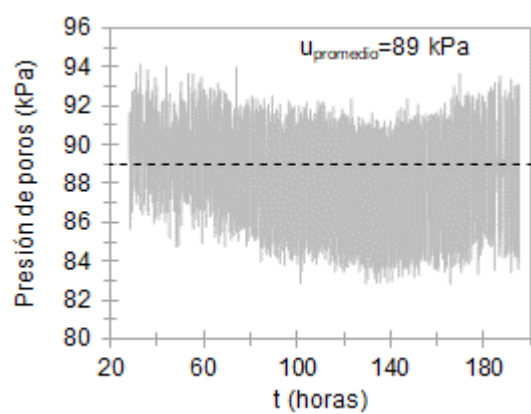
Figura 75. Verificación del parámetro B de Skempton ensayo CD.



a)



b)



c)

Figura 76. Fase de rotura drenada ensayo – CD

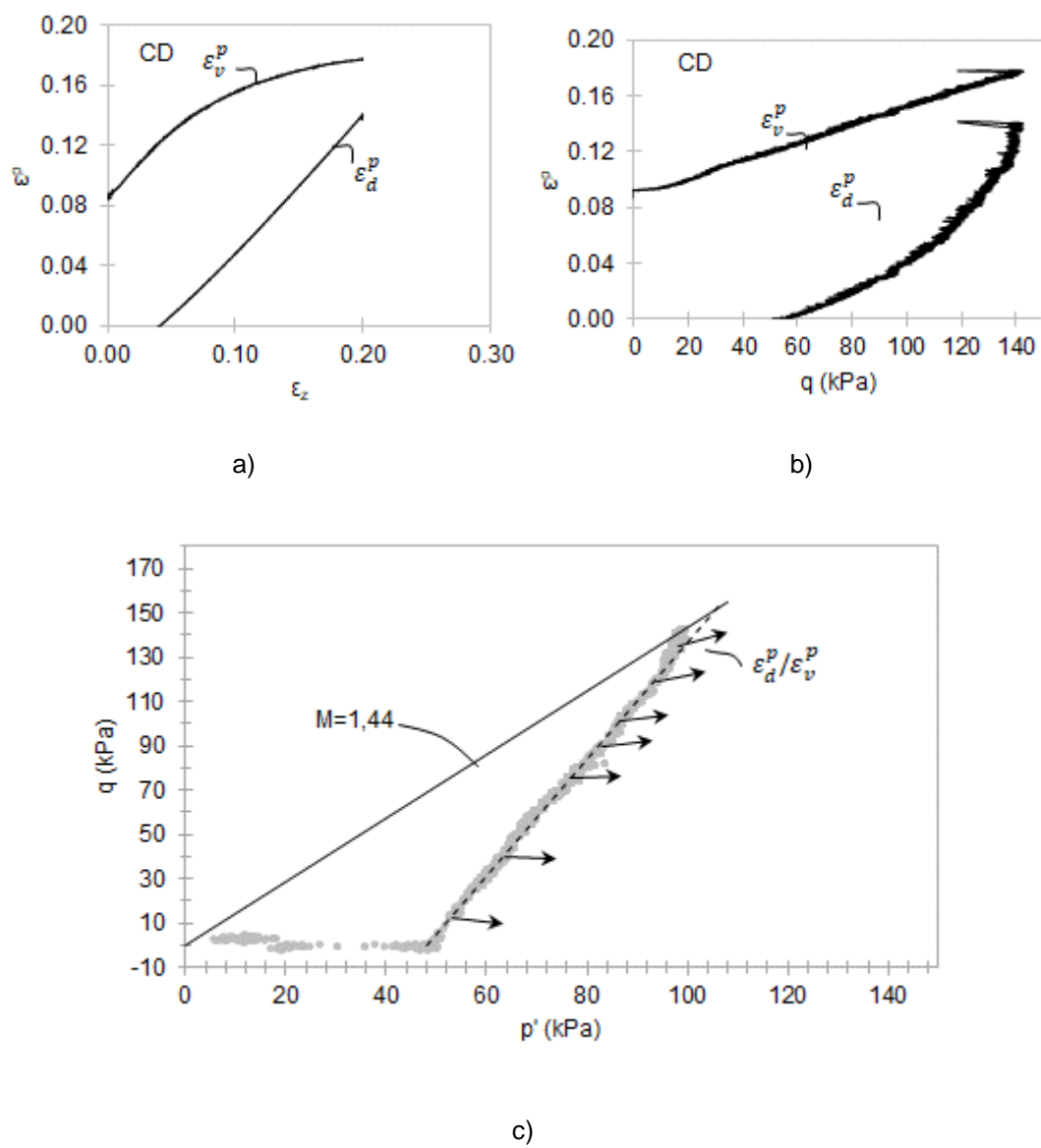


Figura 77. Deformaciones plásticas.

Anexo 3 Ensayo triaxial no drenado – CU

Ensayo 1

Saturación.

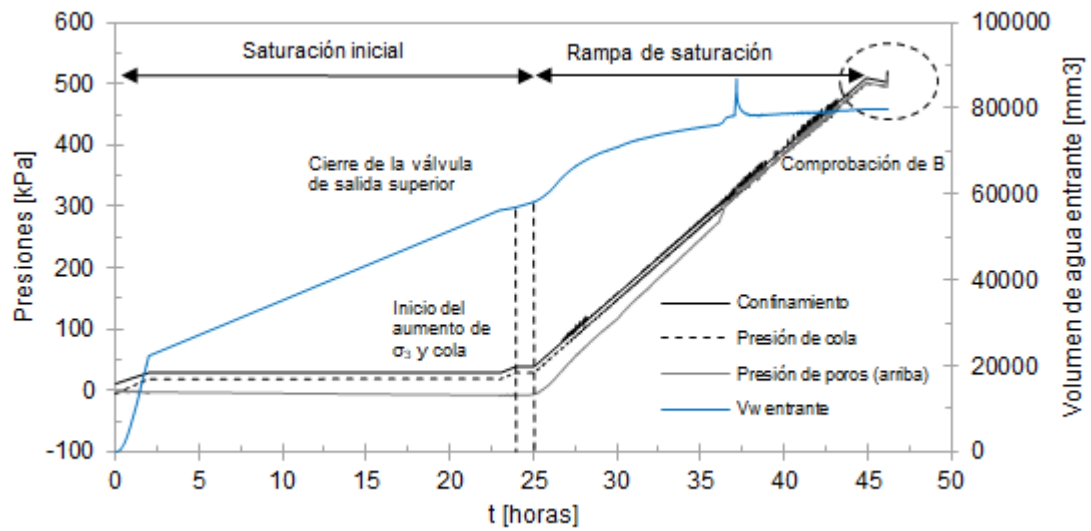


Figura 78. Etapa de saturación ensayo 1 - CU

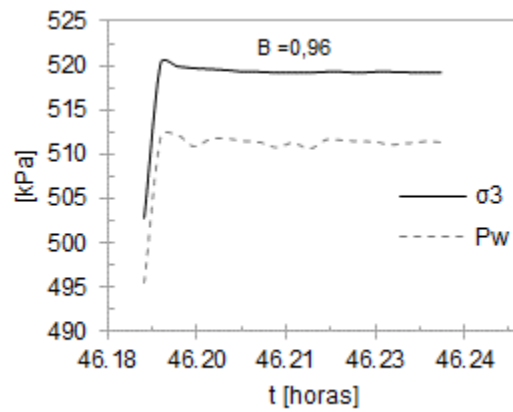
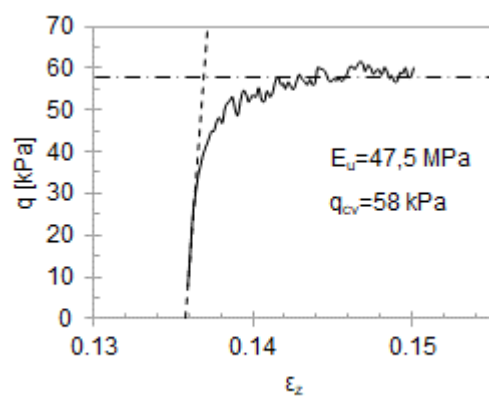
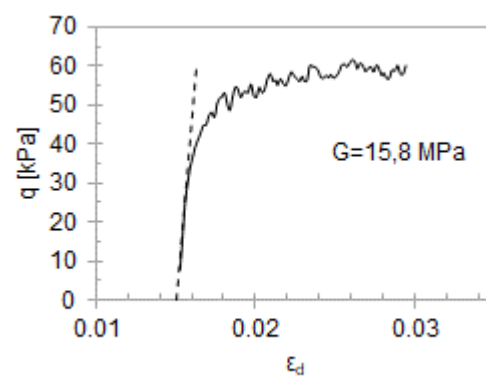


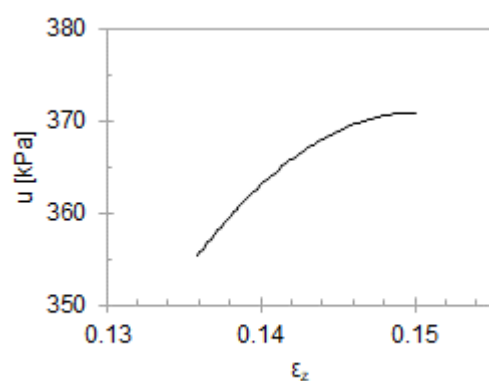
Figura 79. Verificación del parámetro B de Skempton ensayo 1 - CU.



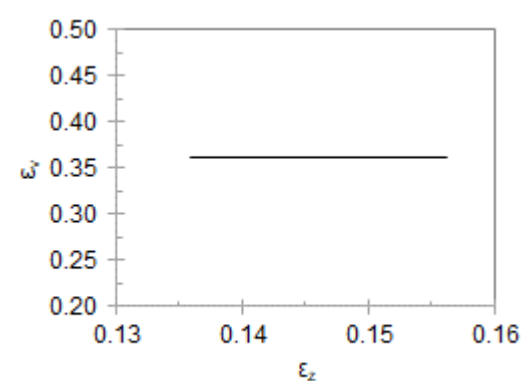
a)



b)

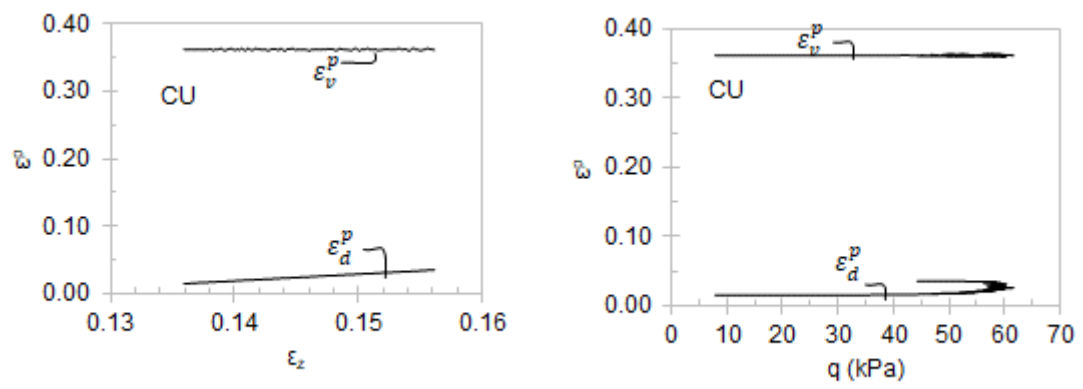


c)



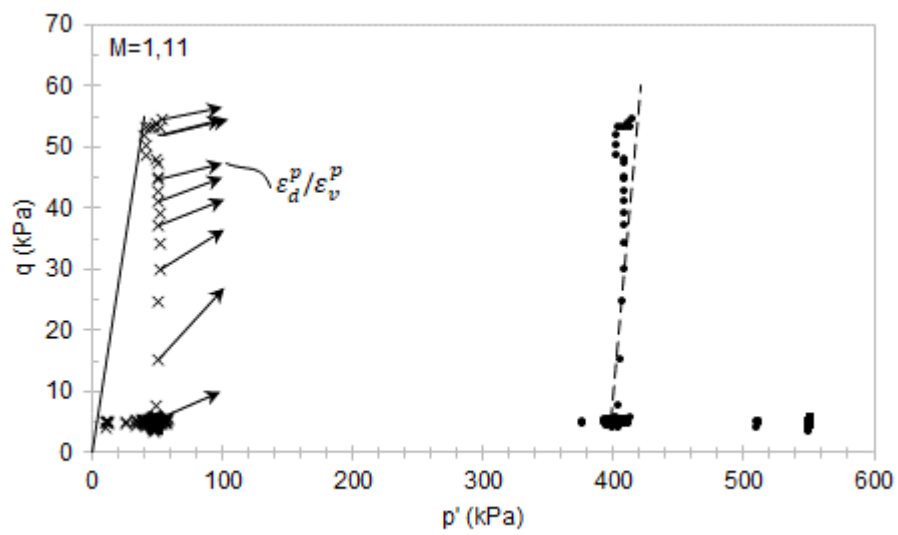
d)

Figura 80. Fase de rotura no drenada ensayo 1 – CU.



a)

b)



c)

Figura 81. Deformaciones Plásticas.

Ensayo 2

Saturación inicial

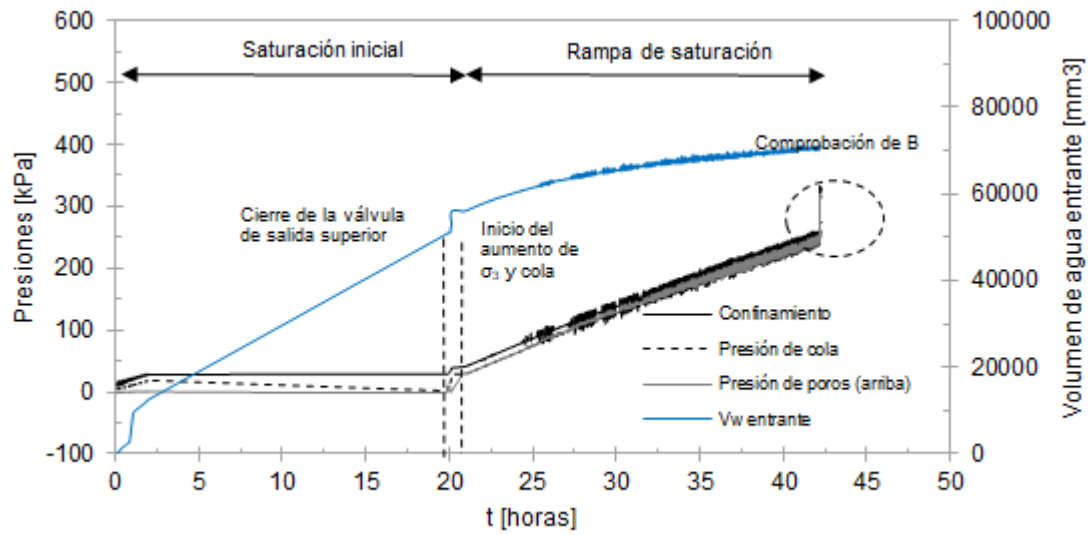


Figura 82. Etapa de saturación ensayo 2 – CU

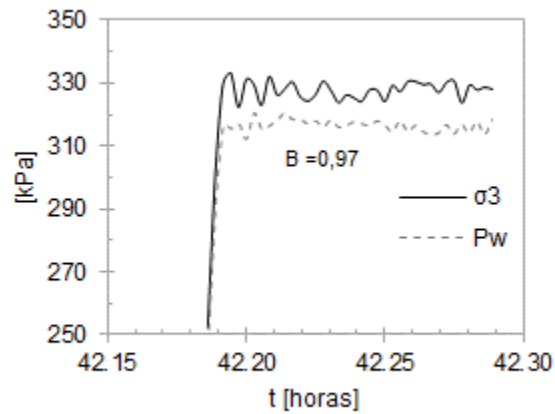
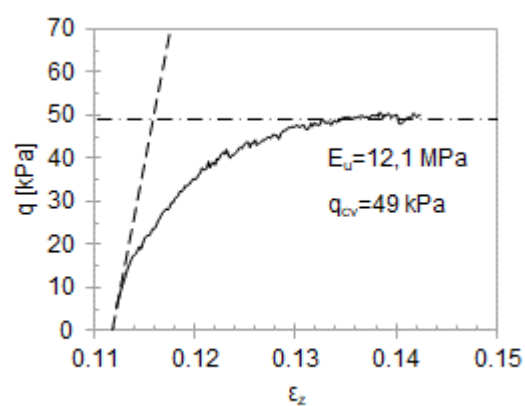
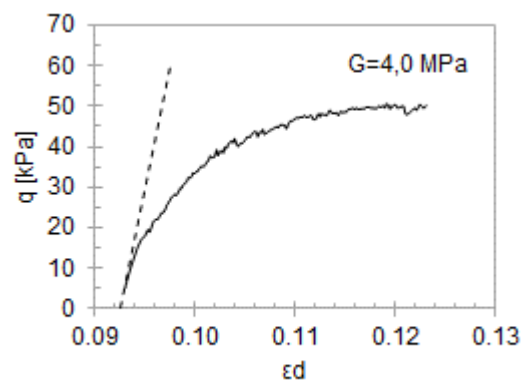


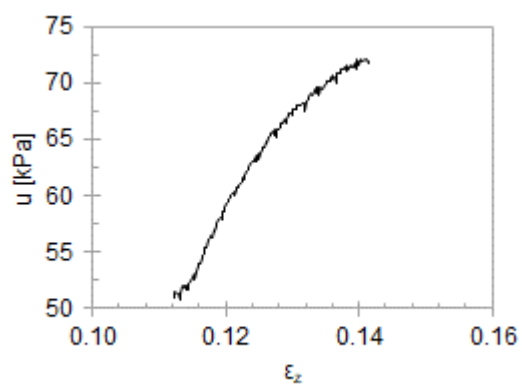
Figura 83. Verificación del parámetro B de Skempton ensayo 2 - CU.



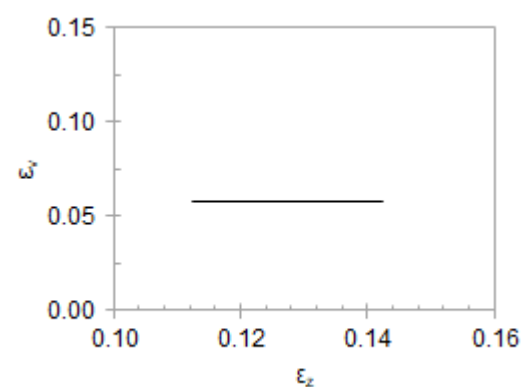
a)



b)

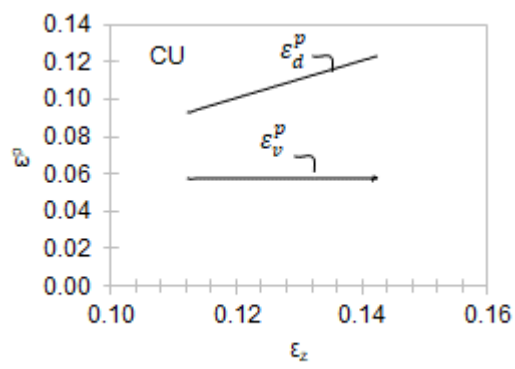


c)

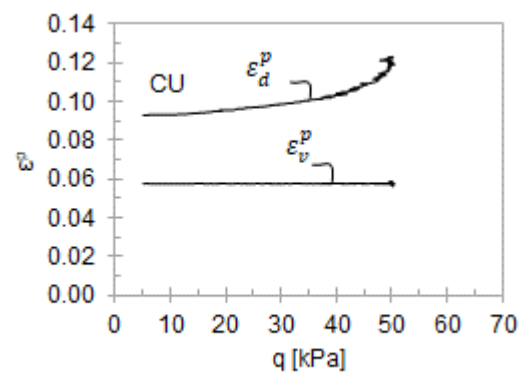


d)

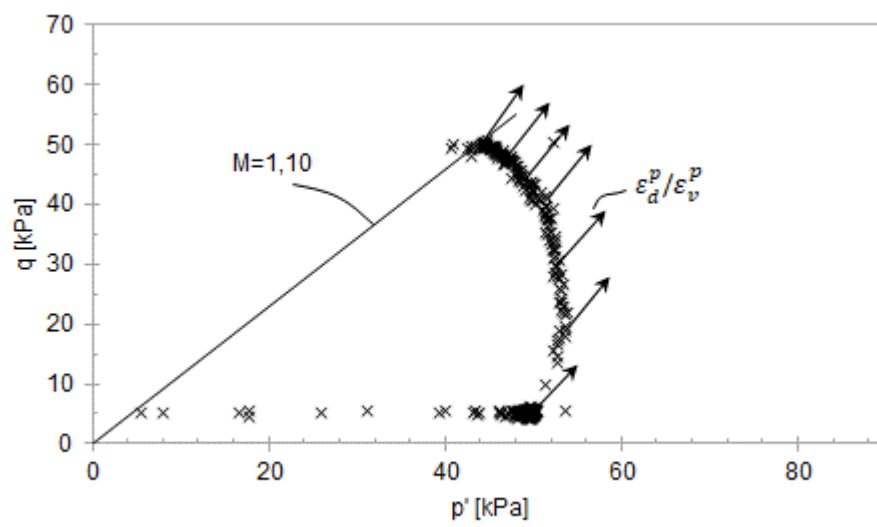
Figura 84. Fase de rotura no drenada ensayo 2 -CU



a)



b)

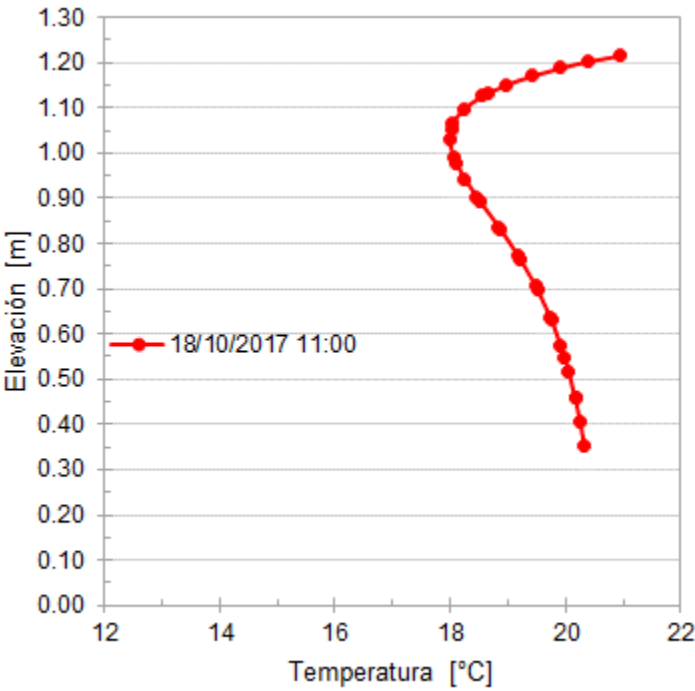
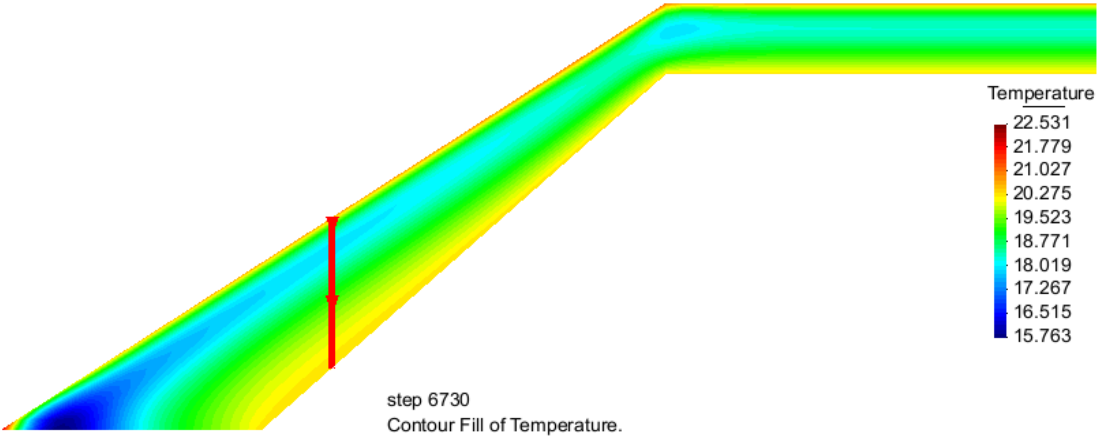


c)

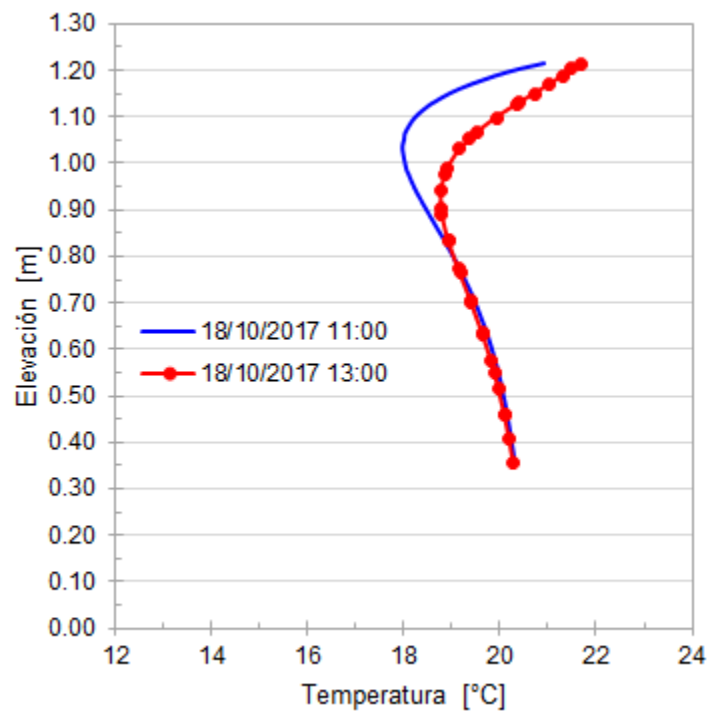
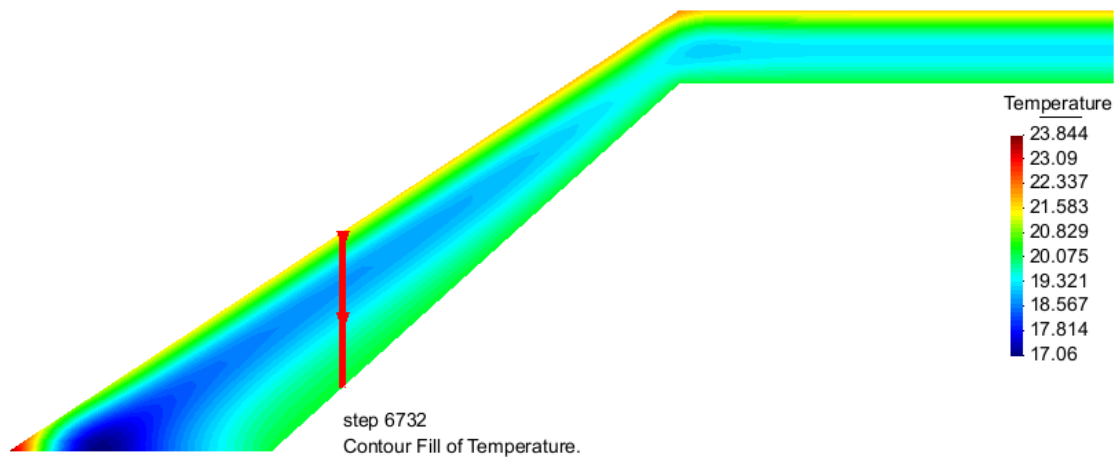
Figura 85. Deformaciones Plásticas.

Anexo 4 Proceso de infiltración simulado

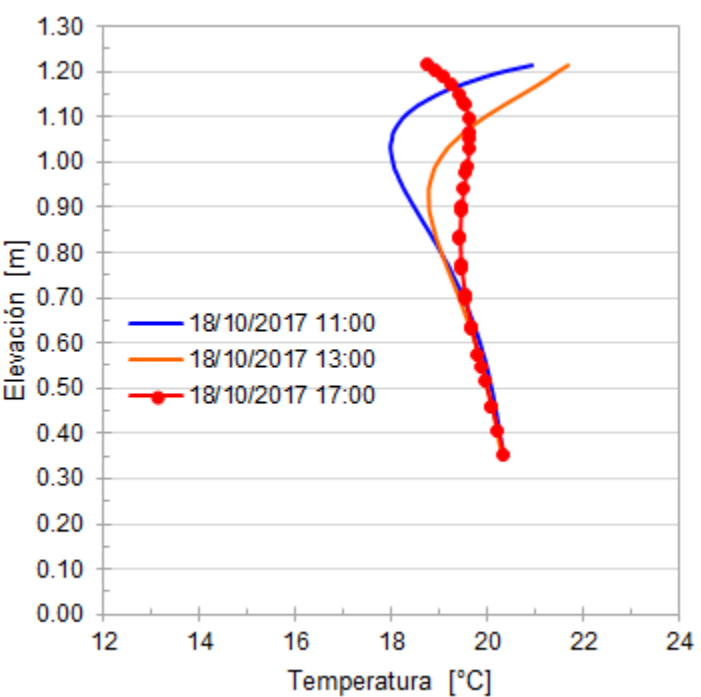
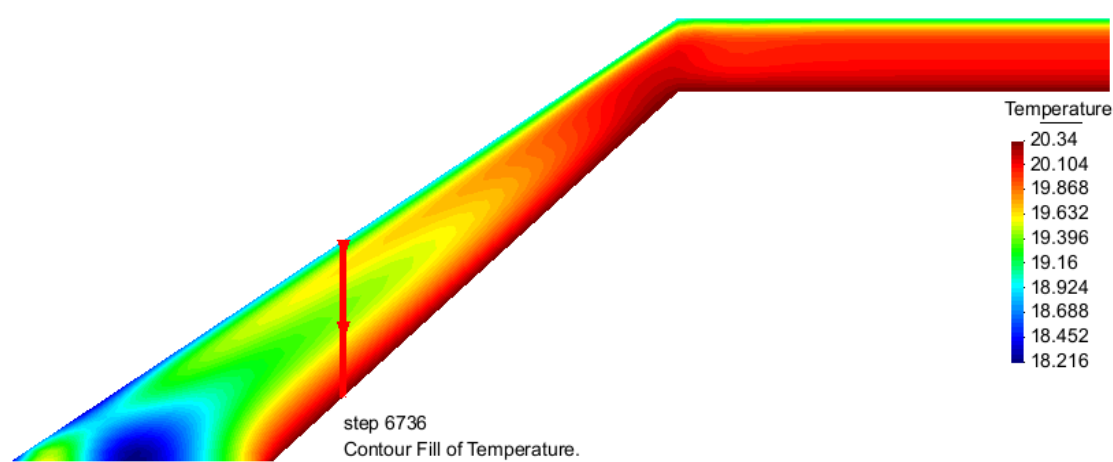
TEMPERATURA



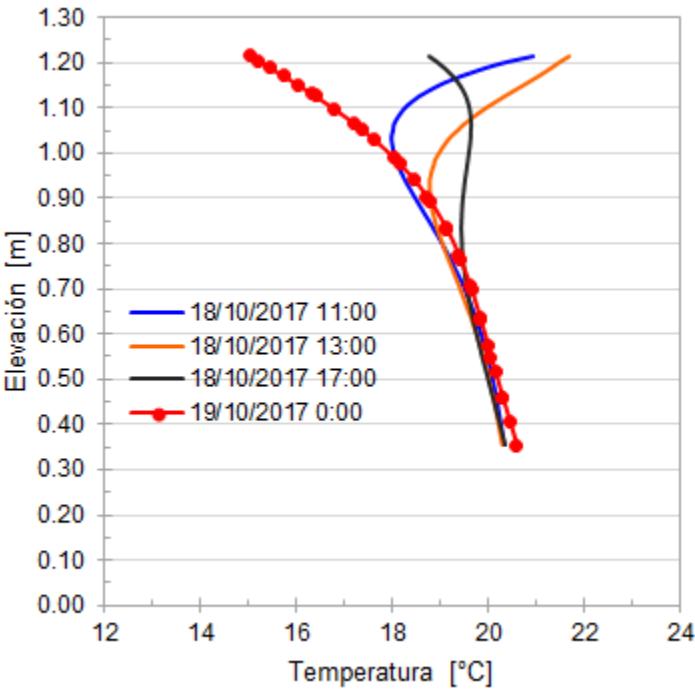
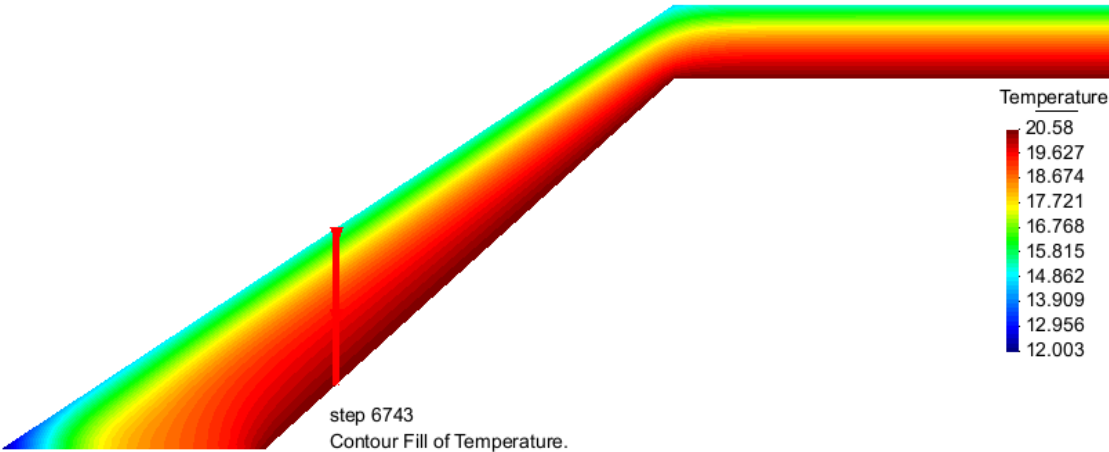
TEMPERATURA



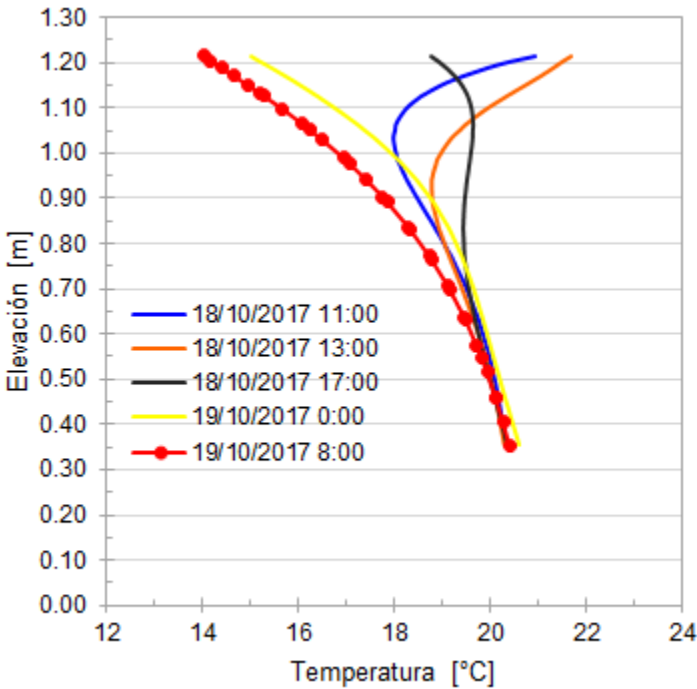
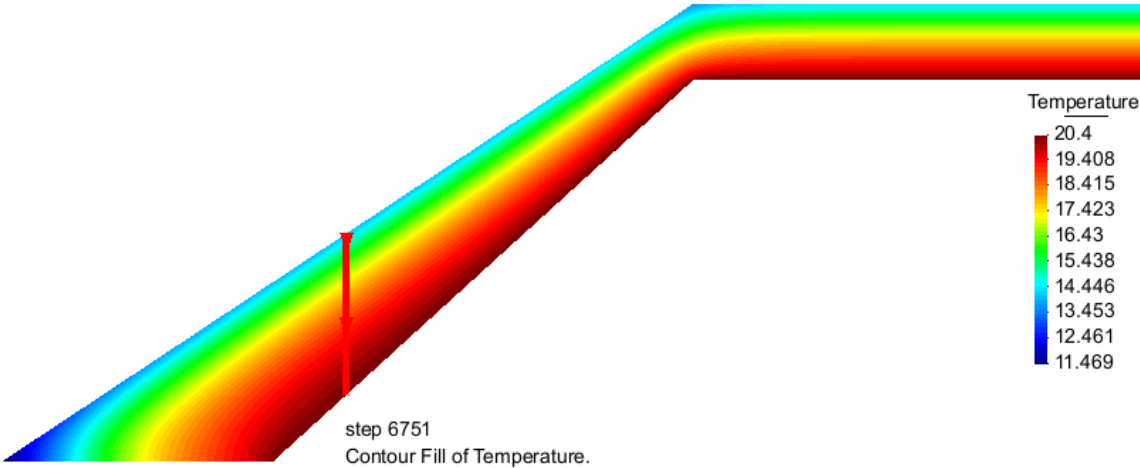
TEMPERATURA



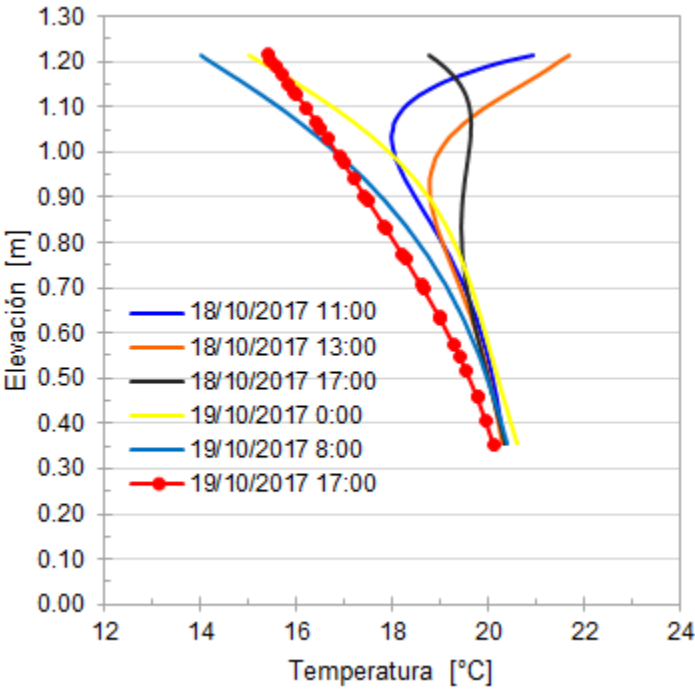
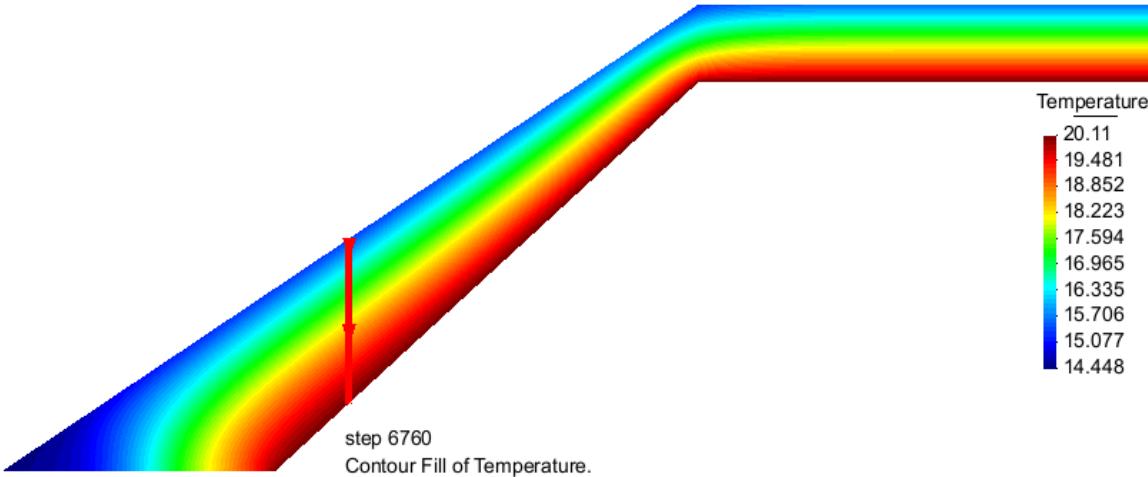
TEMPERATURA



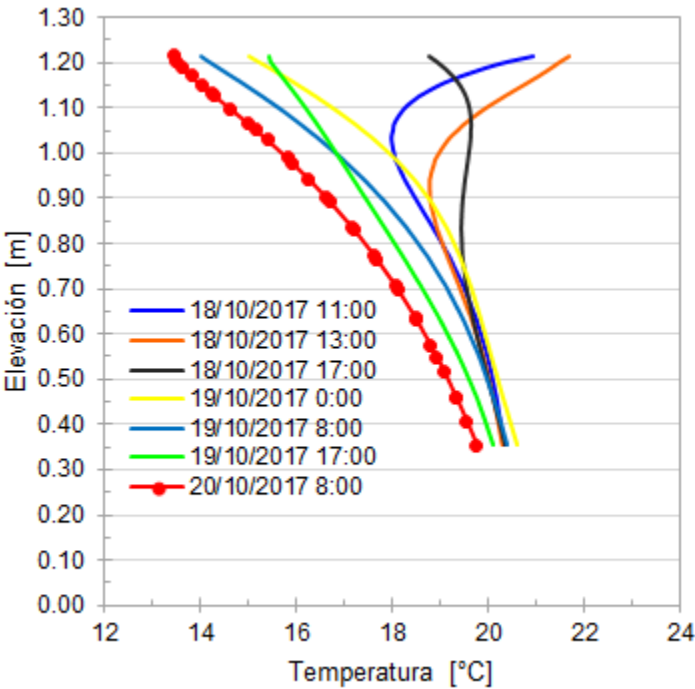
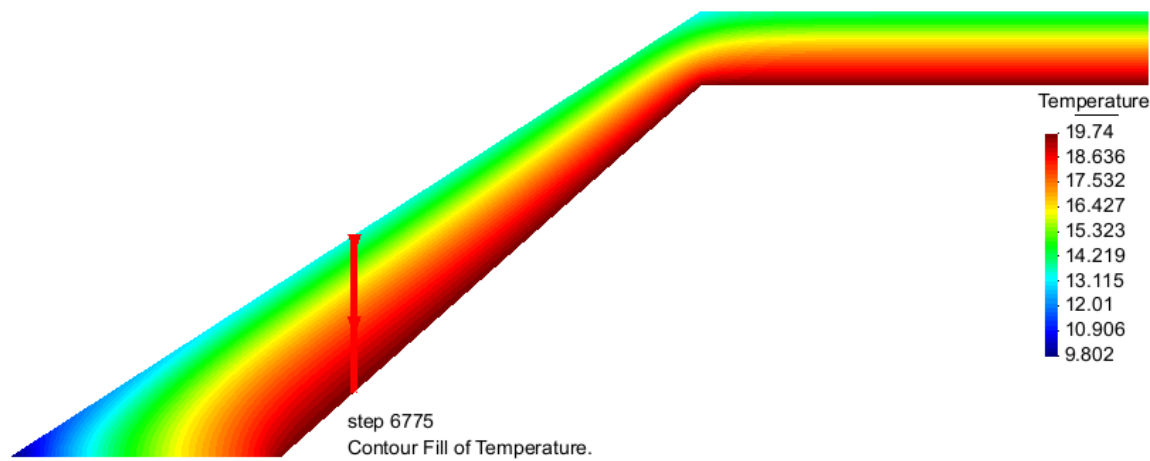
TEMPERATURA



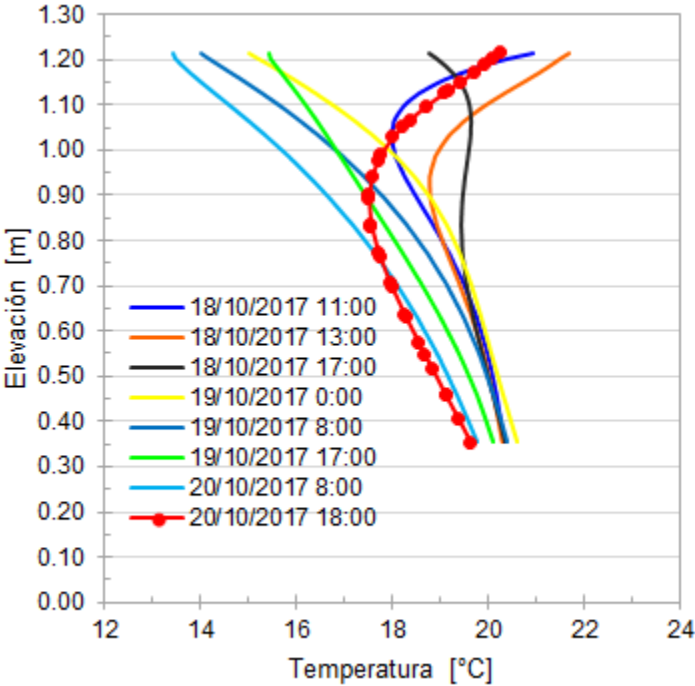
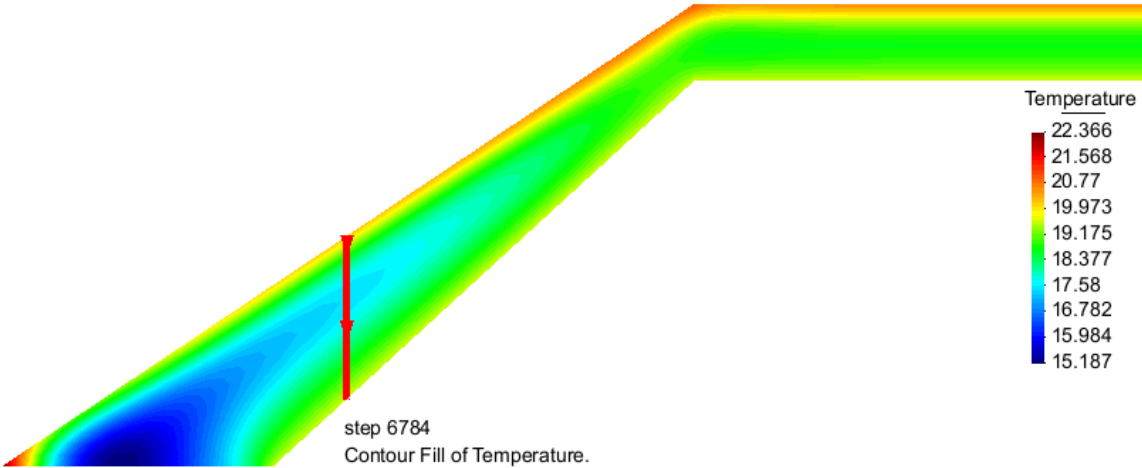
TEMPERATURA



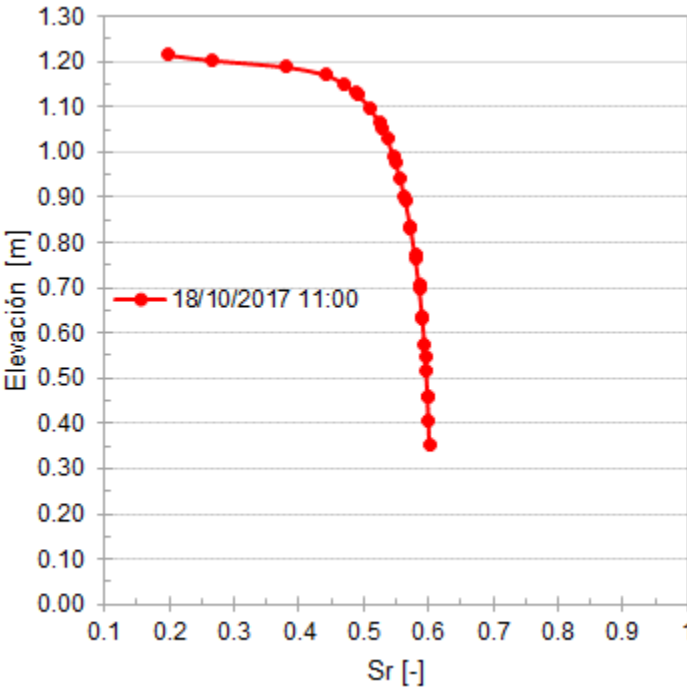
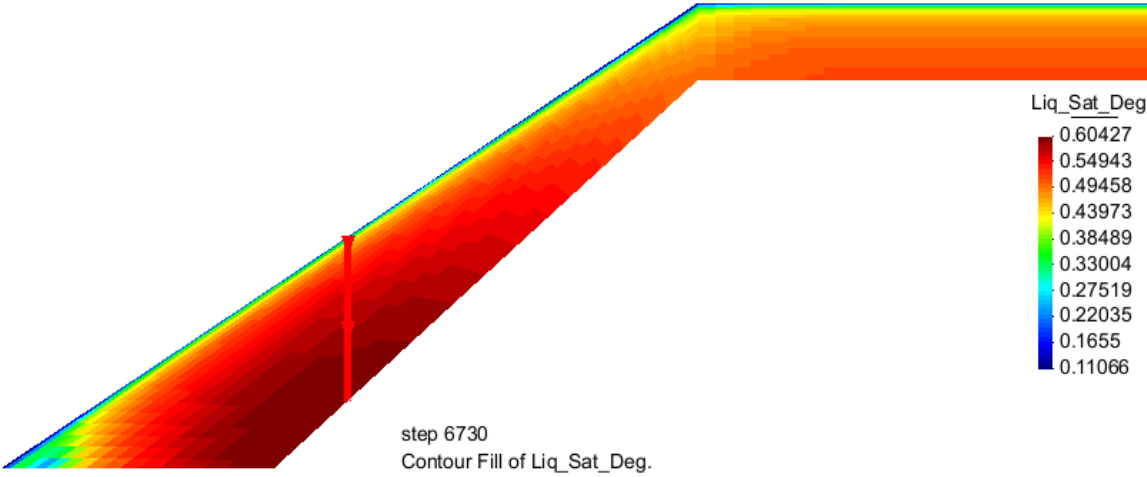
TEMPERATURA



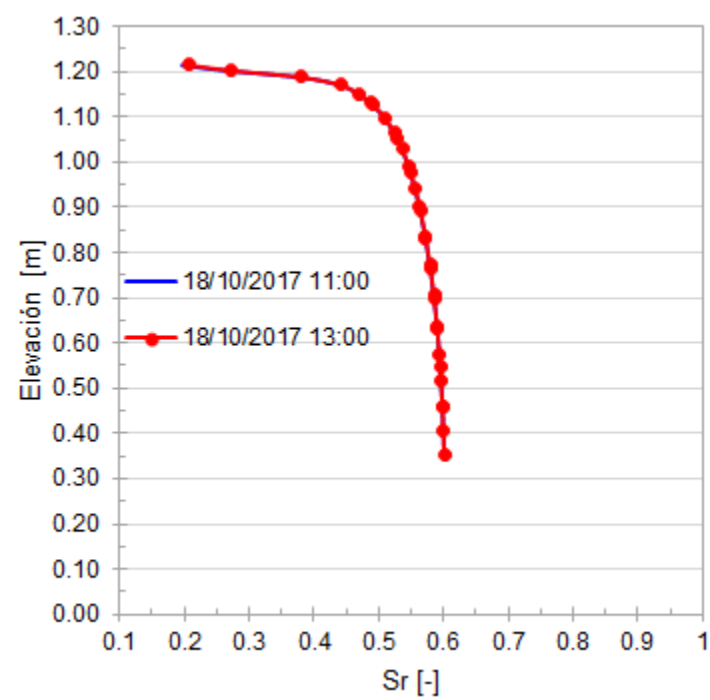
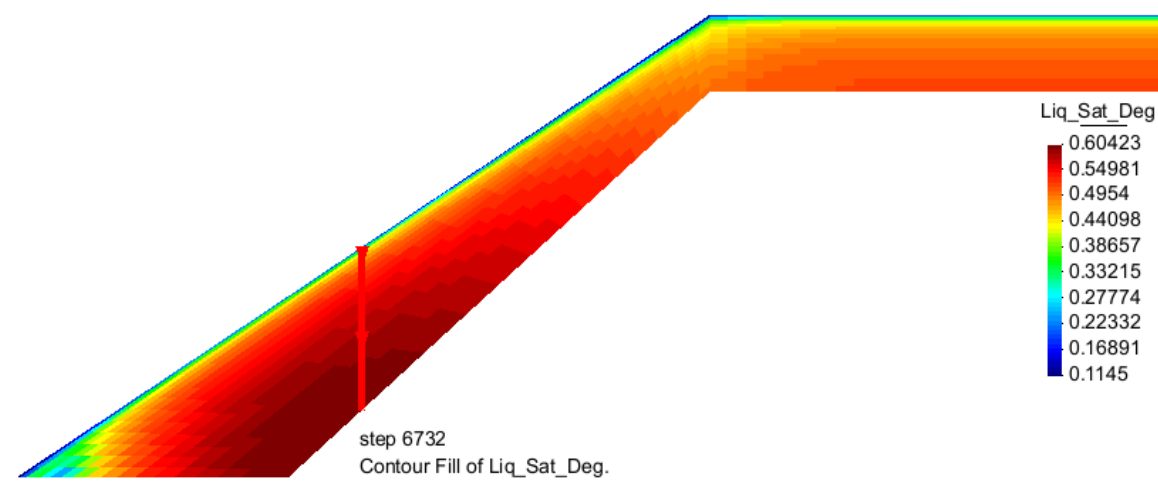
TEMPERATURA



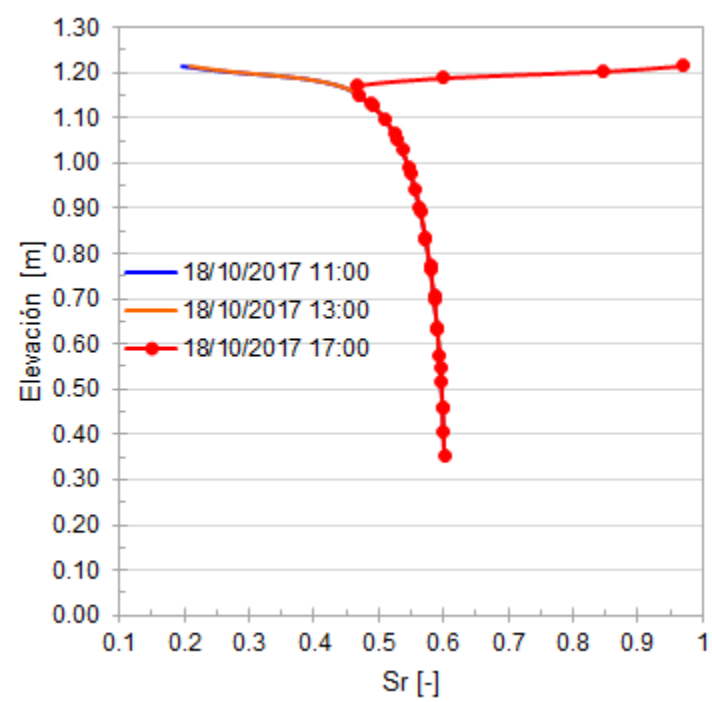
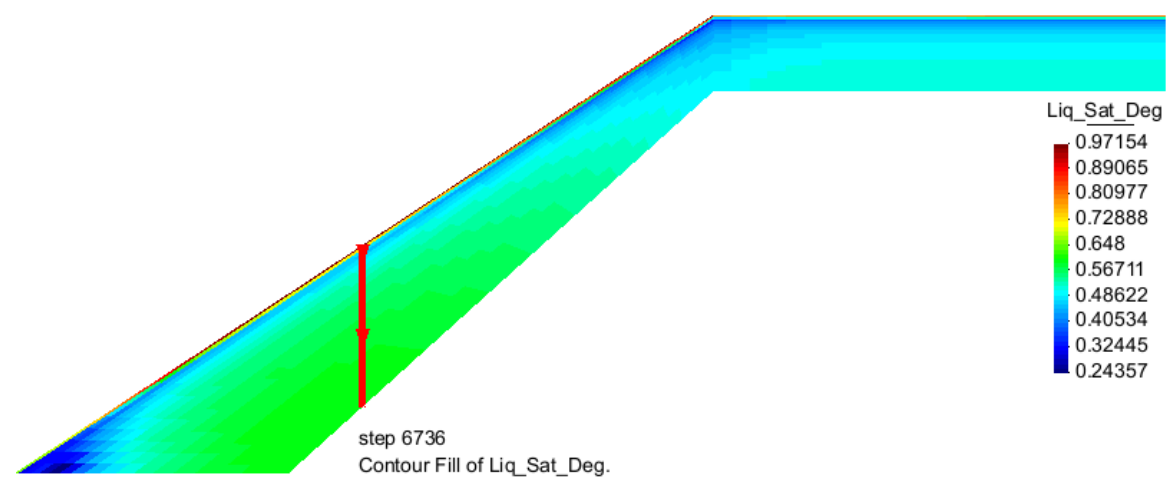
GRADO DE SATURACIÓN



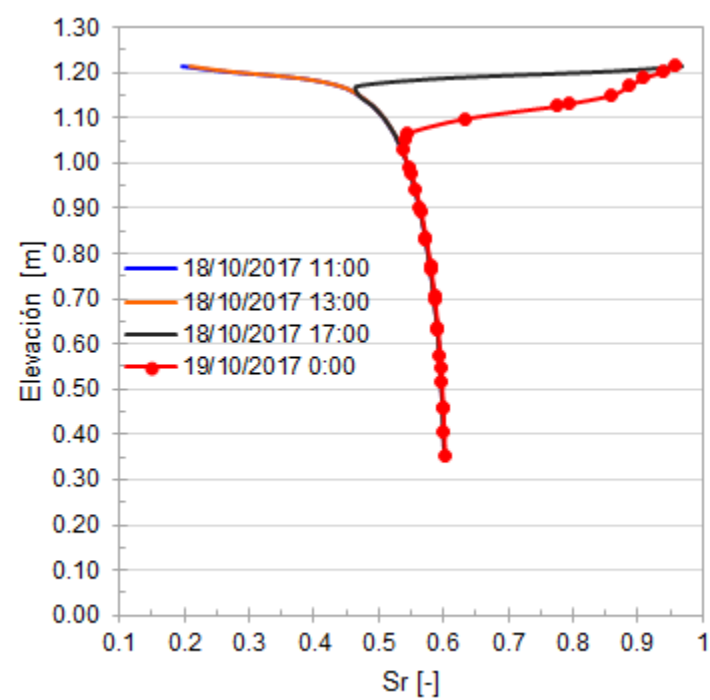
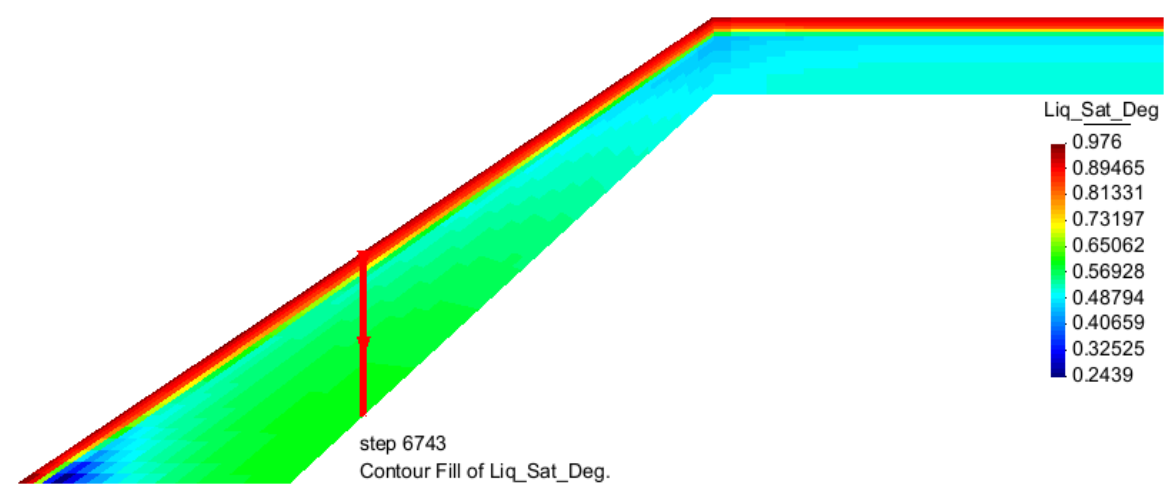
GRADO DE SATURACIÓN



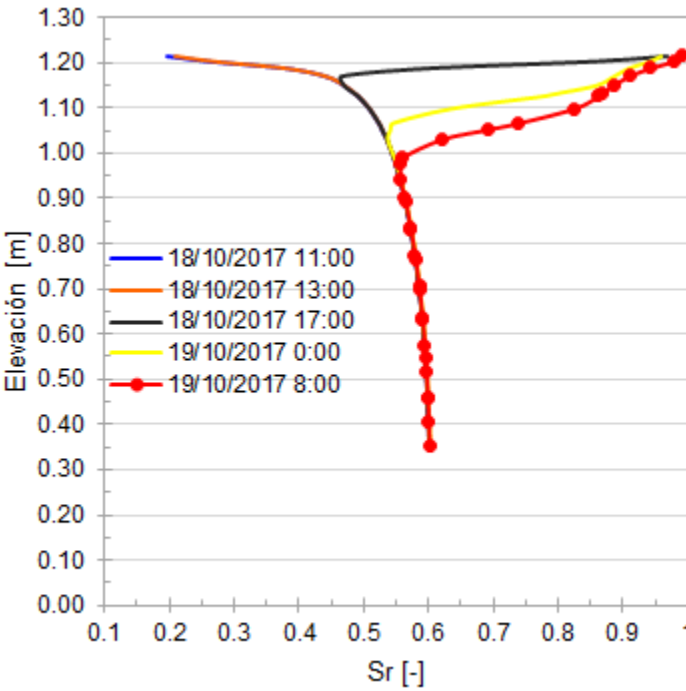
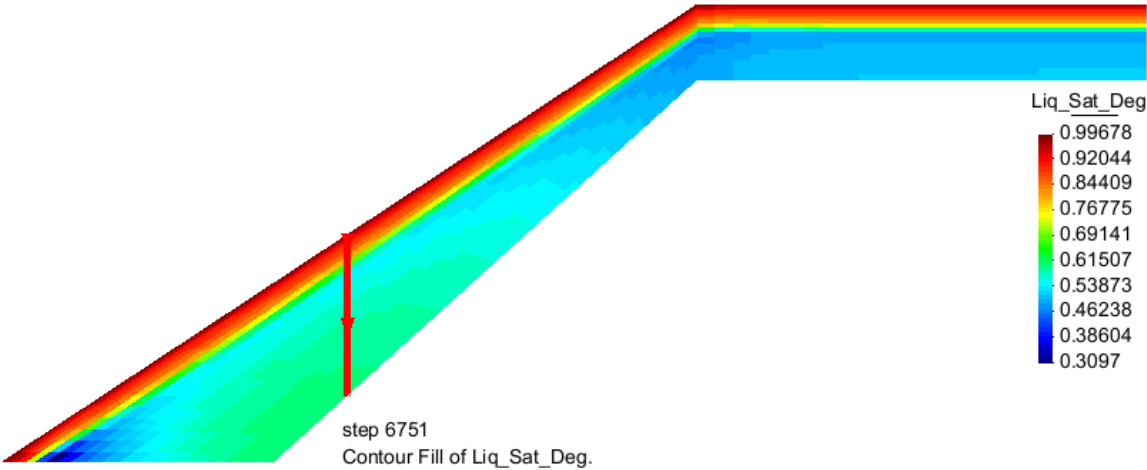
GRADO DE SATURACIÓN



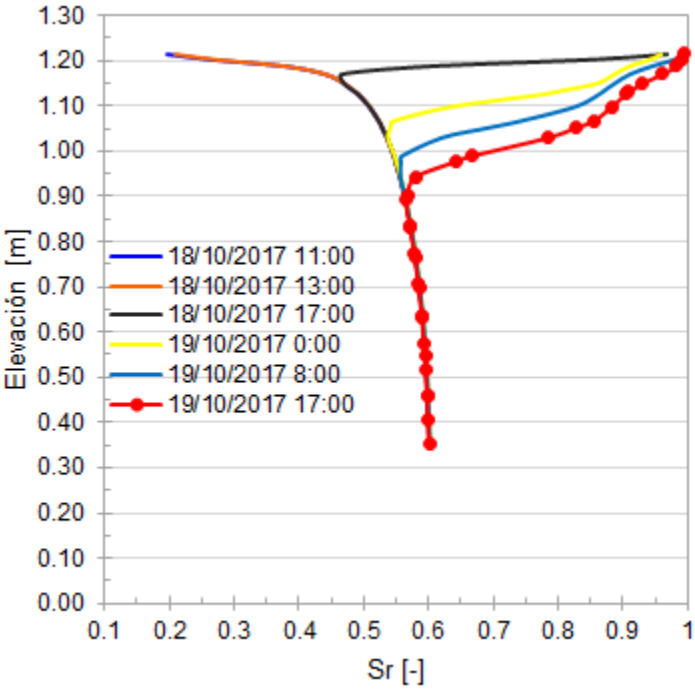
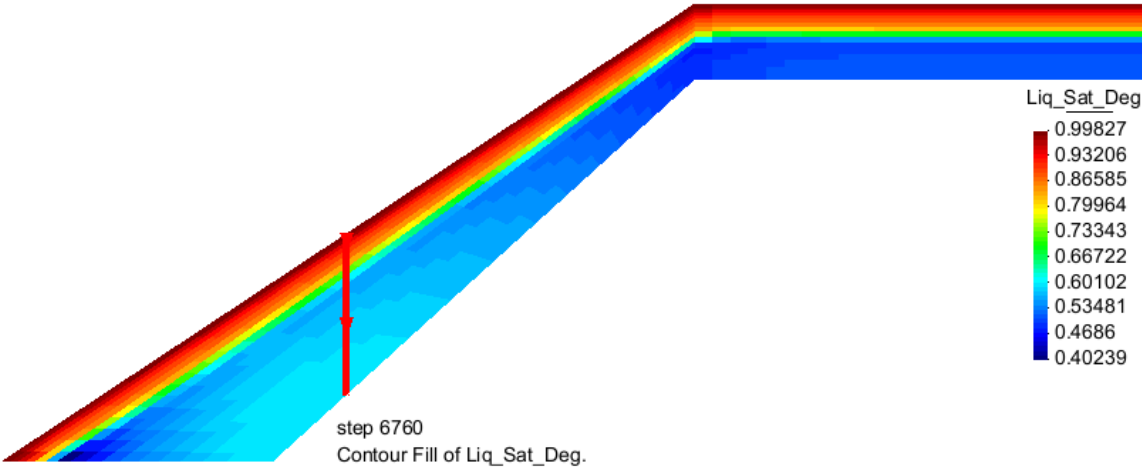
GRADO DE SATURACIÓN



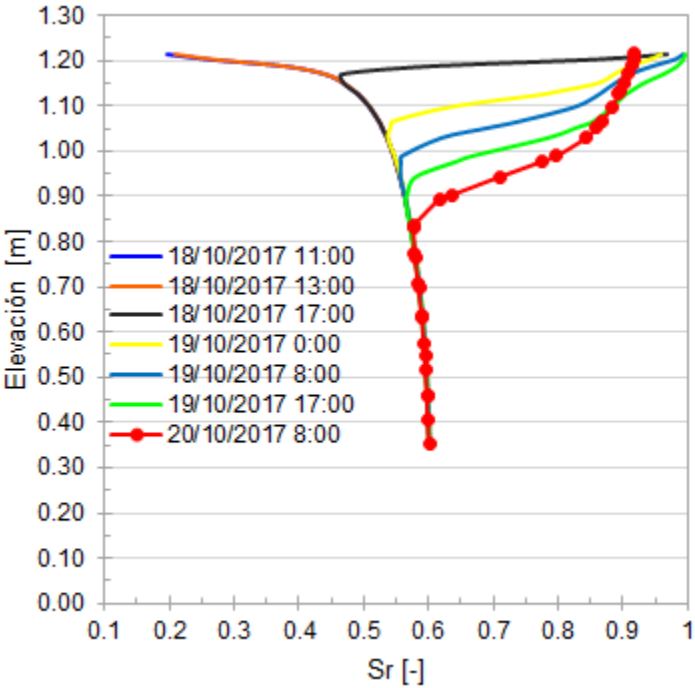
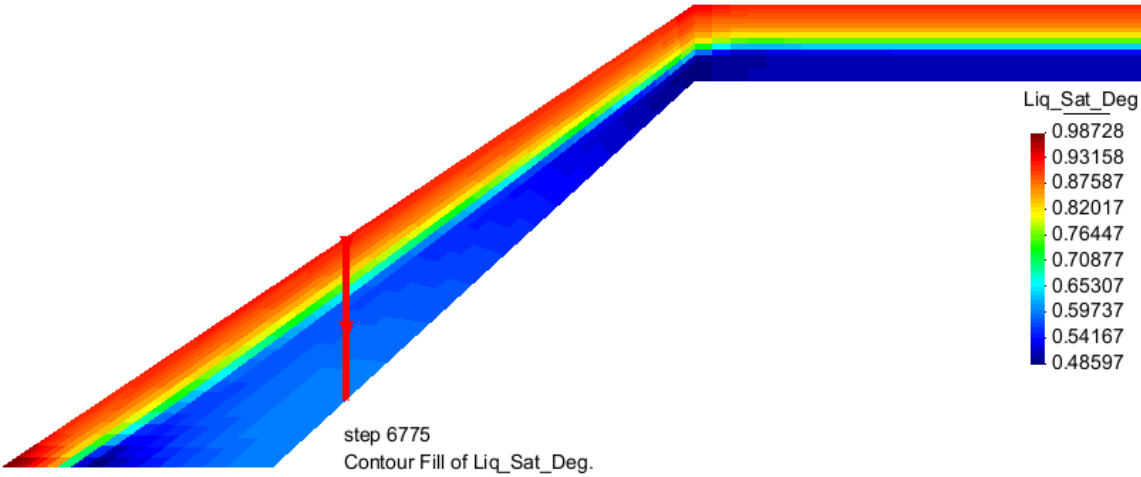
GRADO DE SATURACIÓN



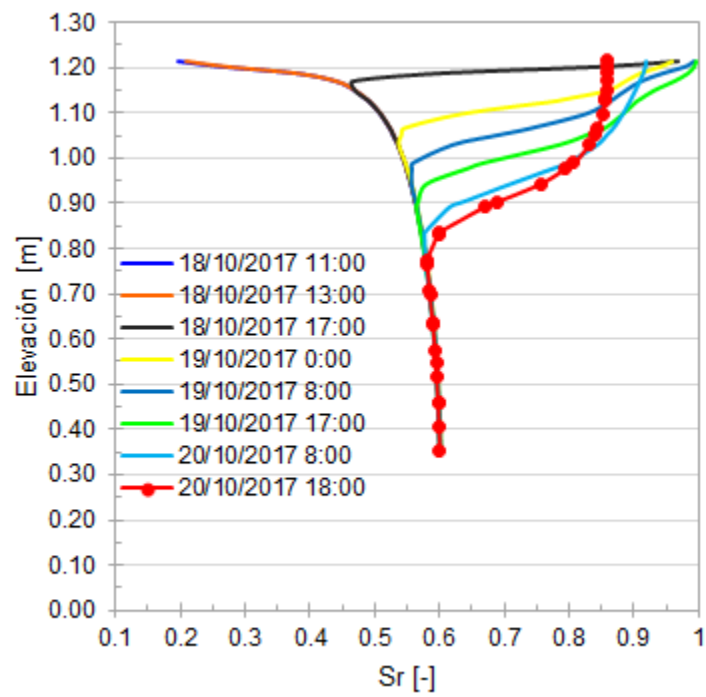
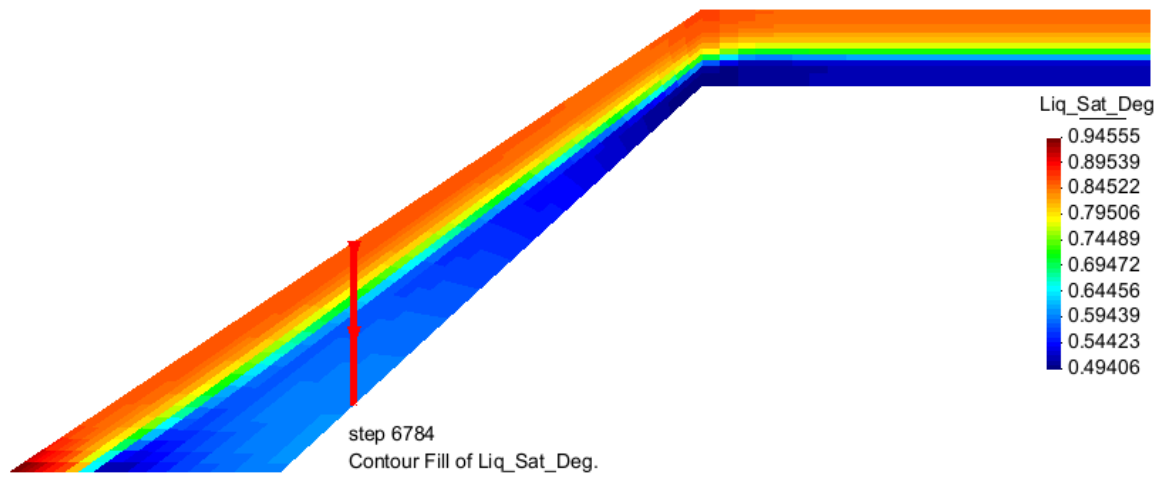
GRADO DE SATURACIÓN



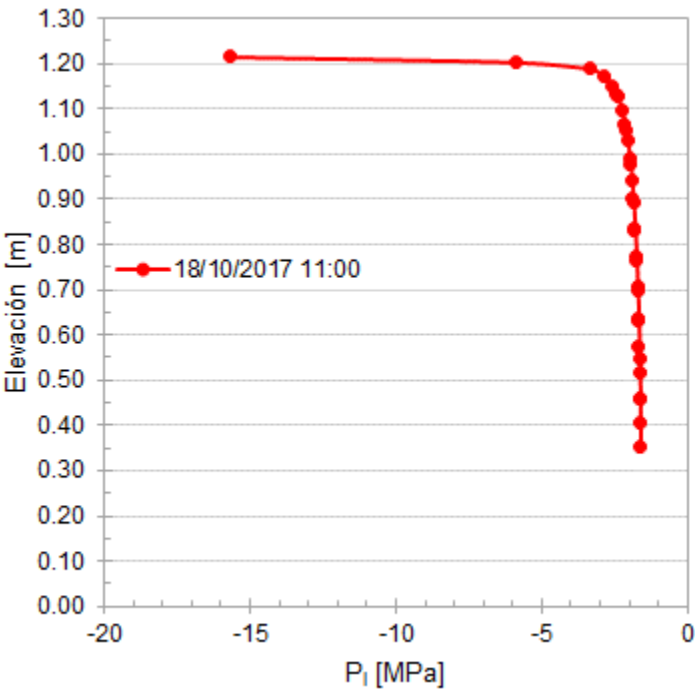
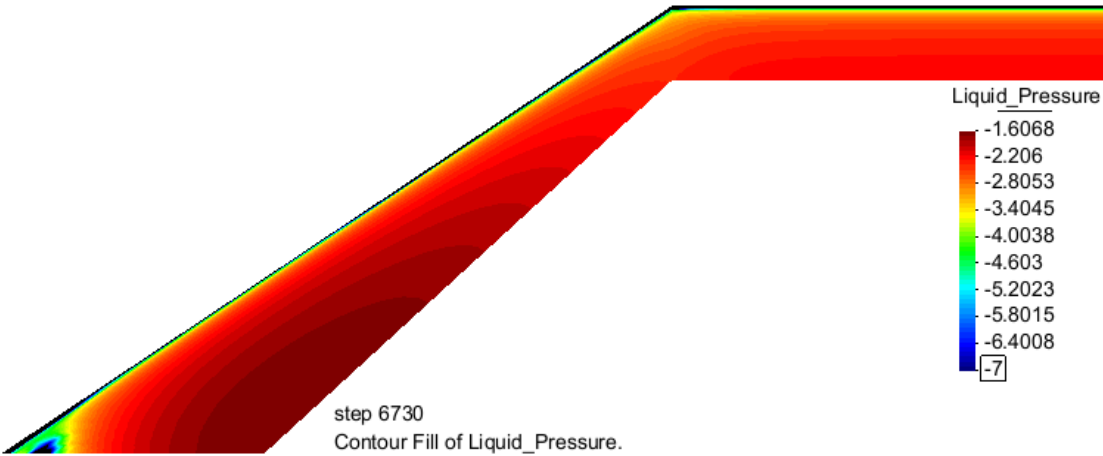
GRADO DE SATURACIÓN



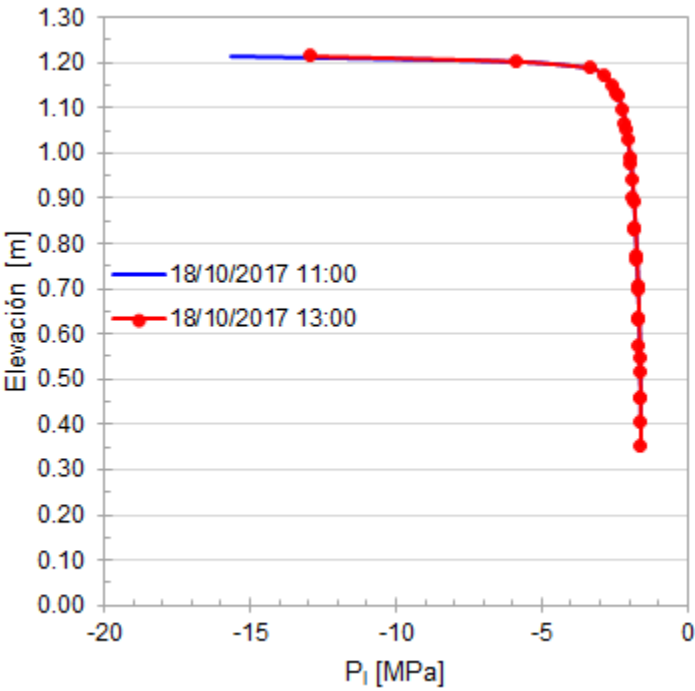
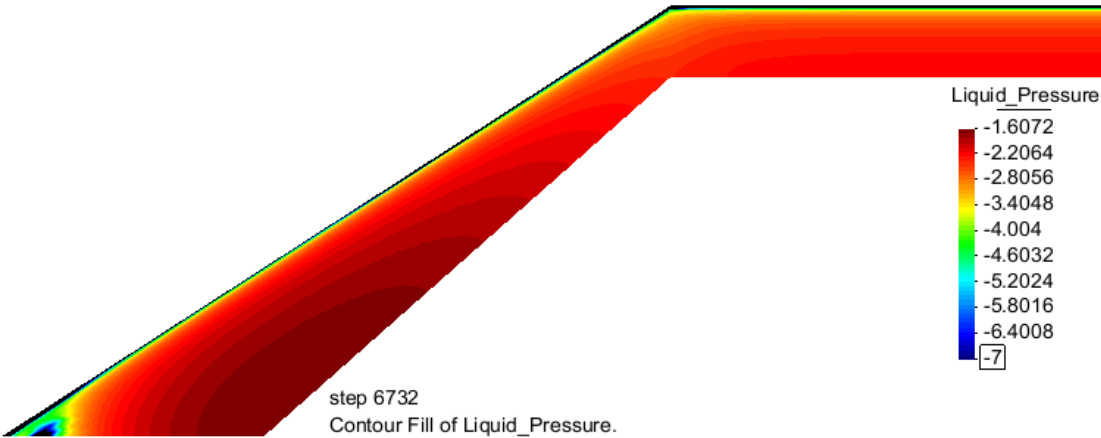
GRADO DE SATURACIÓN



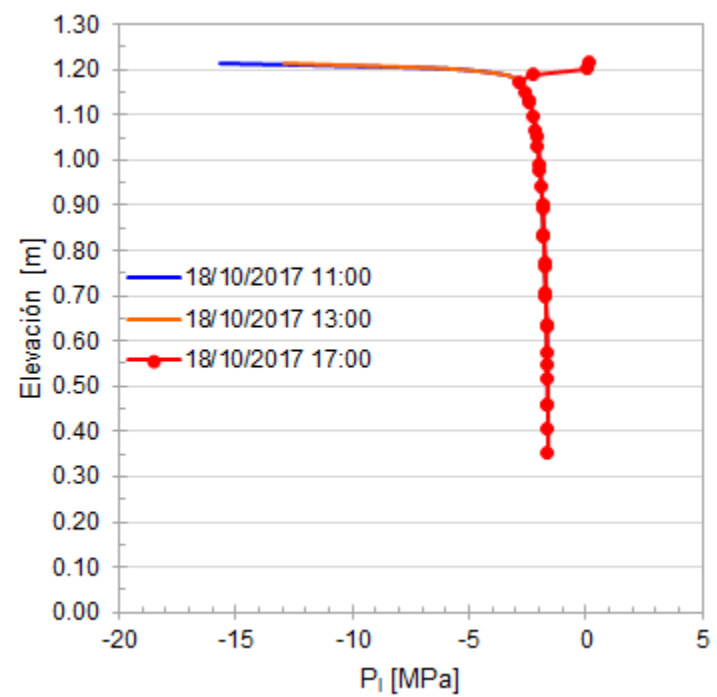
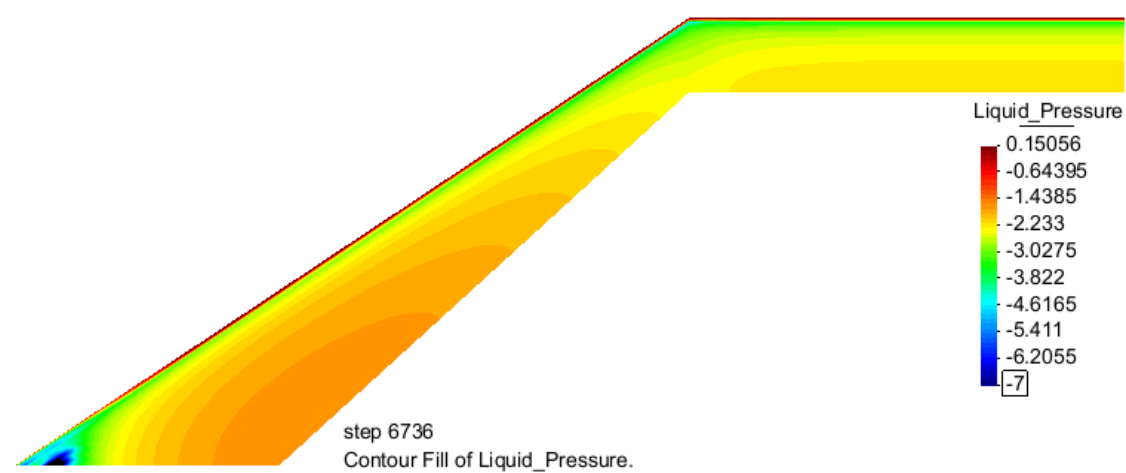
PRESIÓN DE LÍQUIDO



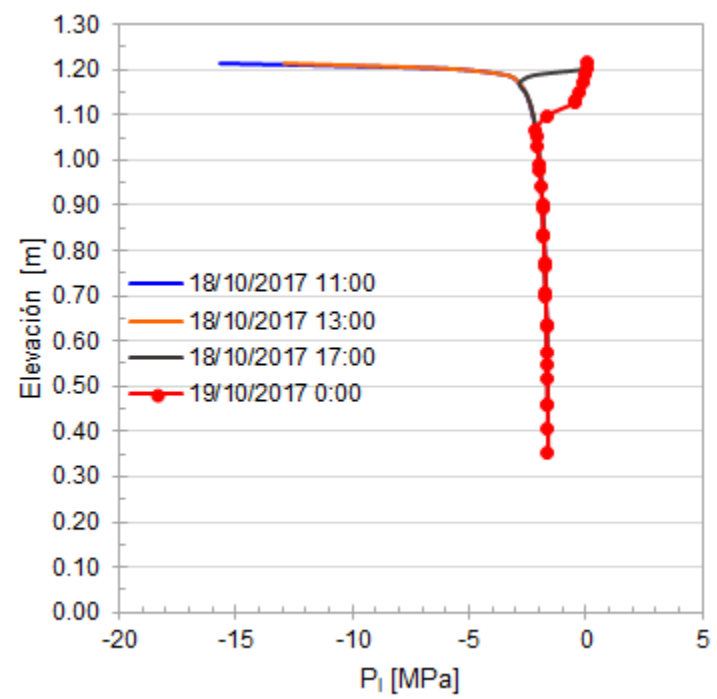
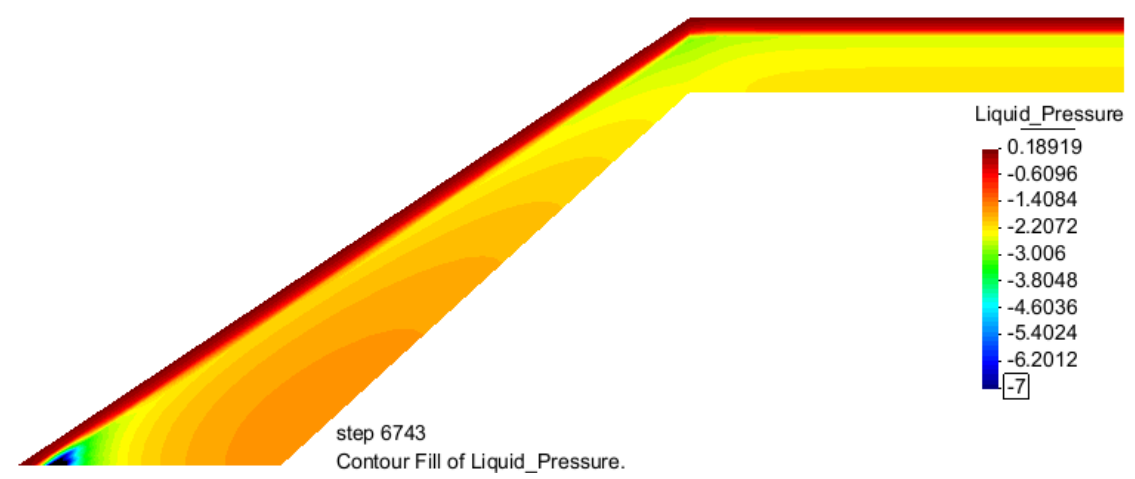
PRESIÓN DE LÍQUIDO



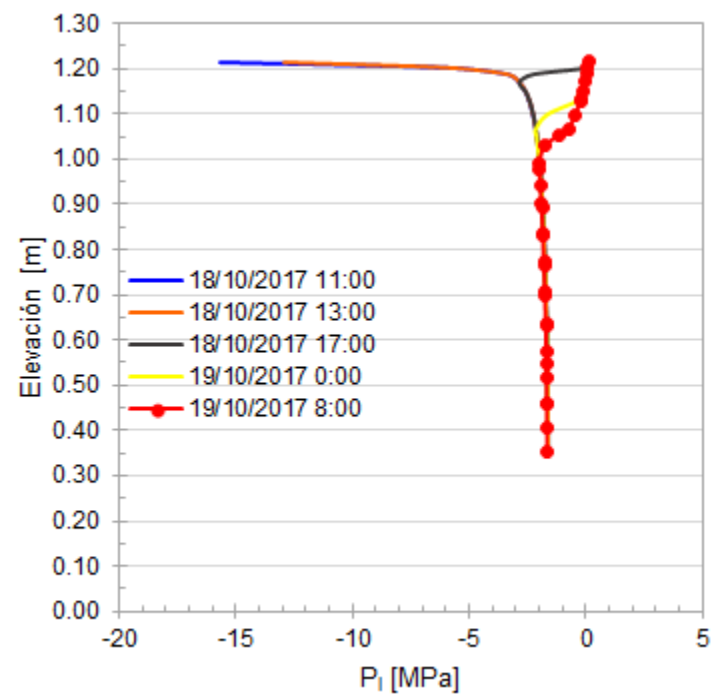
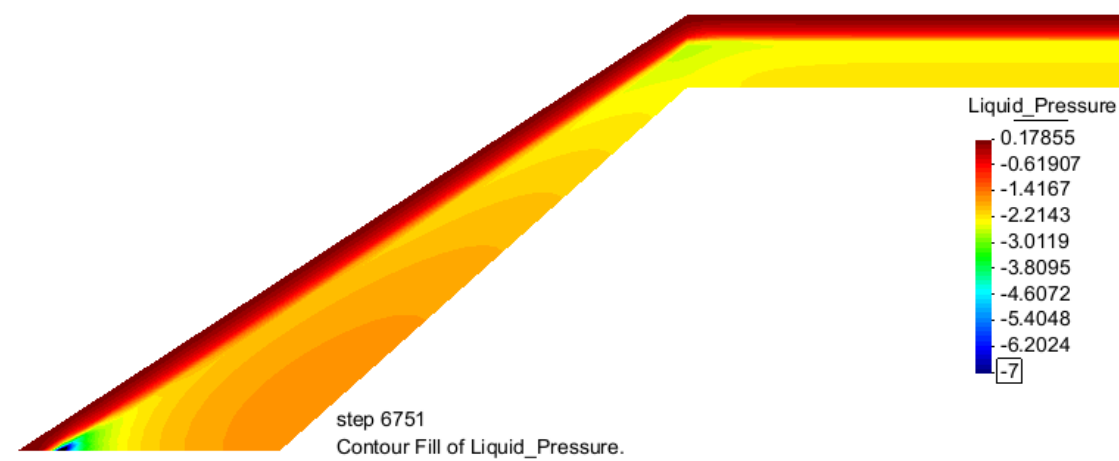
PRESIÓN DE LÍQUIDO



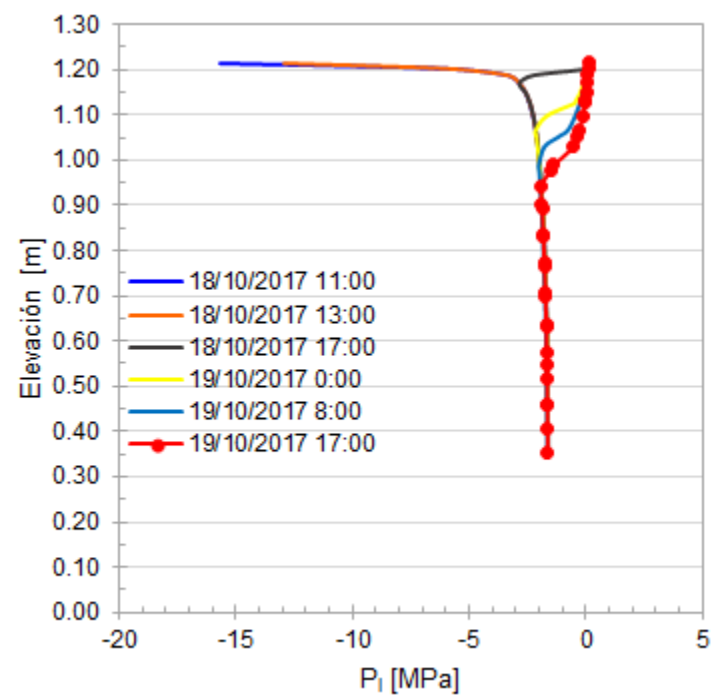
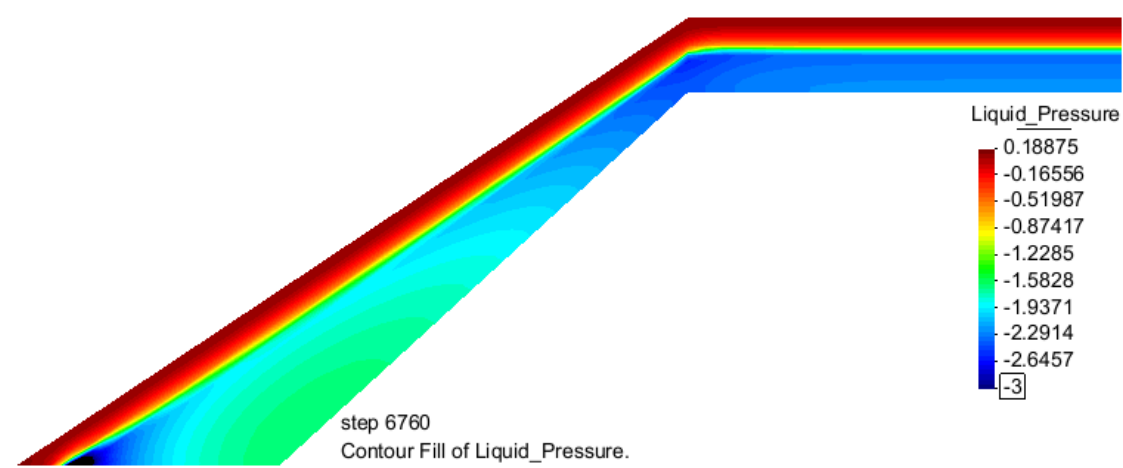
PRESIÓN DE LÍQUIDO



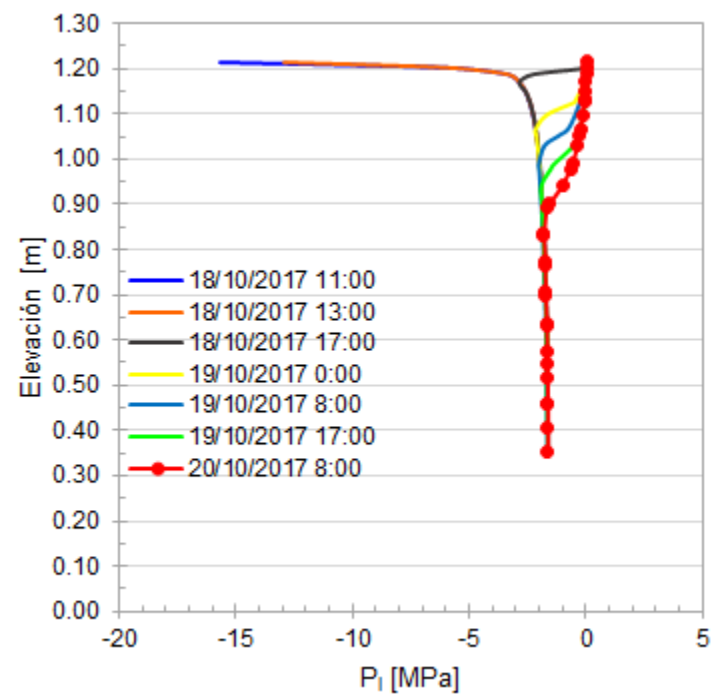
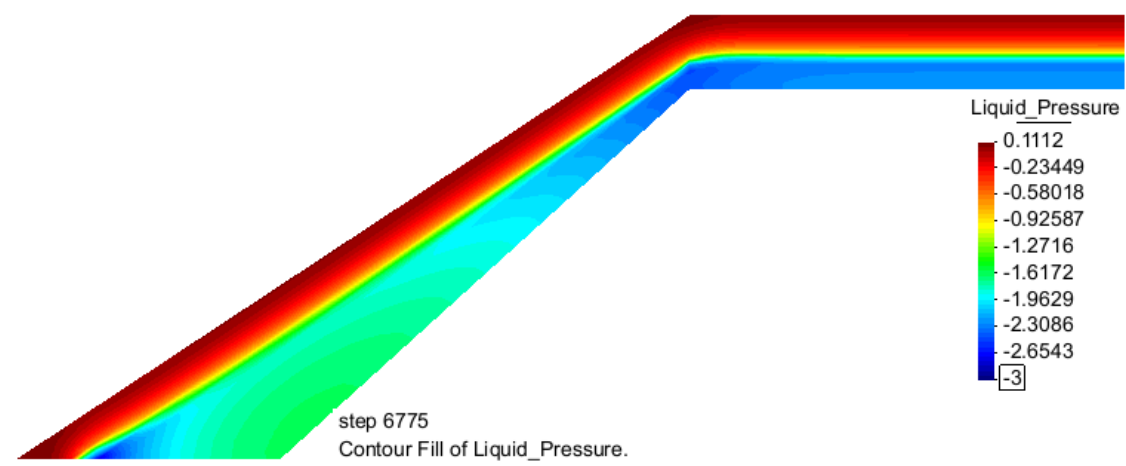
PRESIÓN DE LÍQUIDO



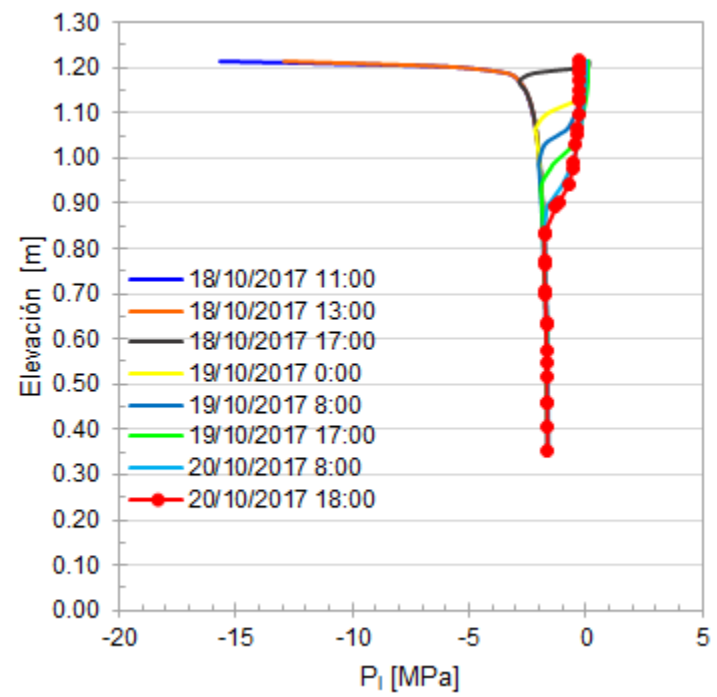
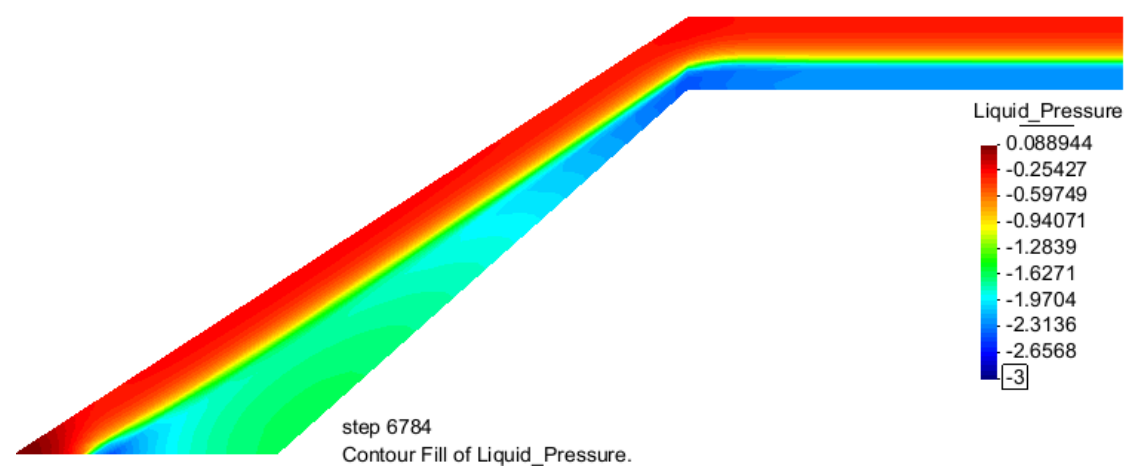
PRESIÓN DE LÍQUIDO



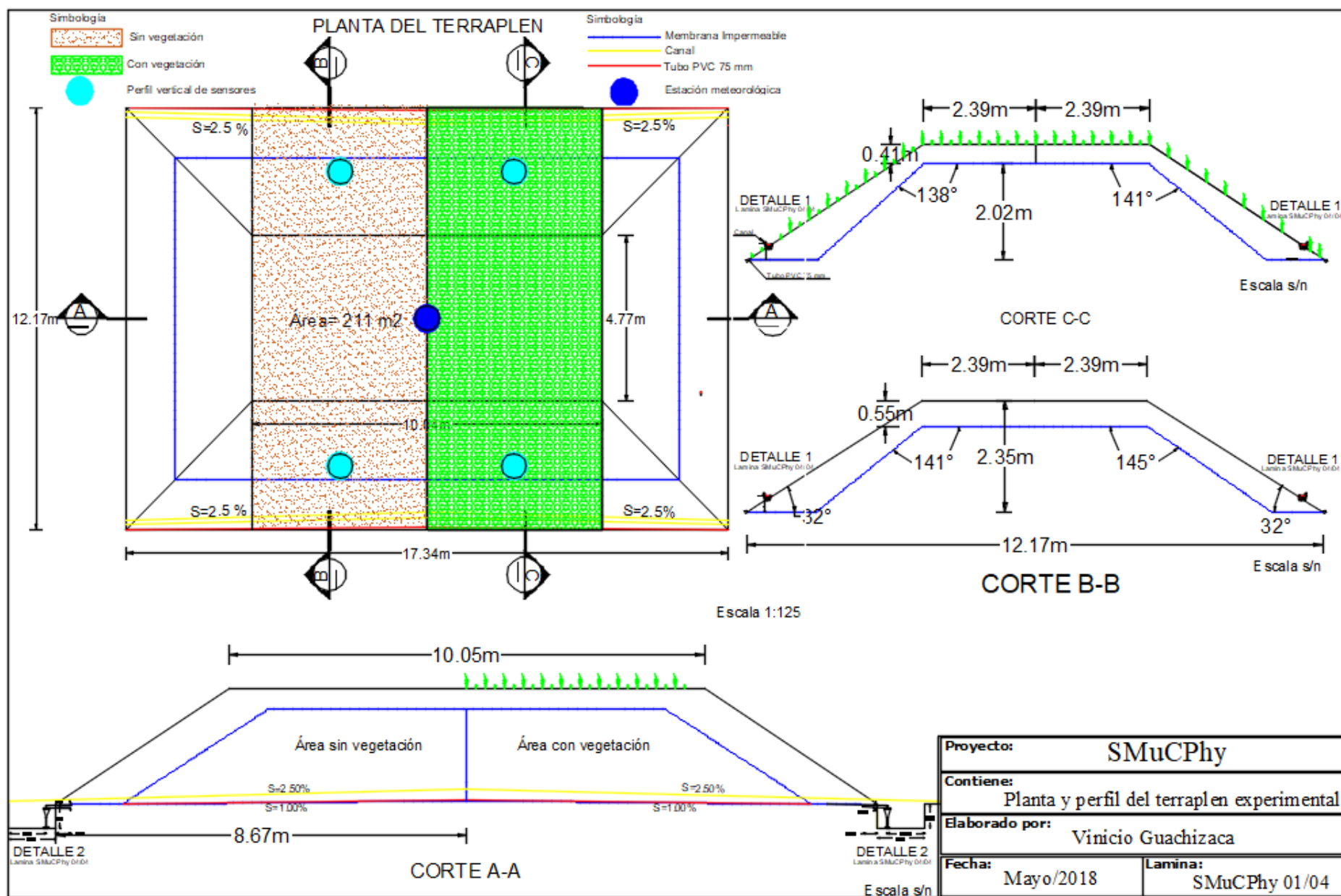
PRESIÓN DE LÍQUIDO



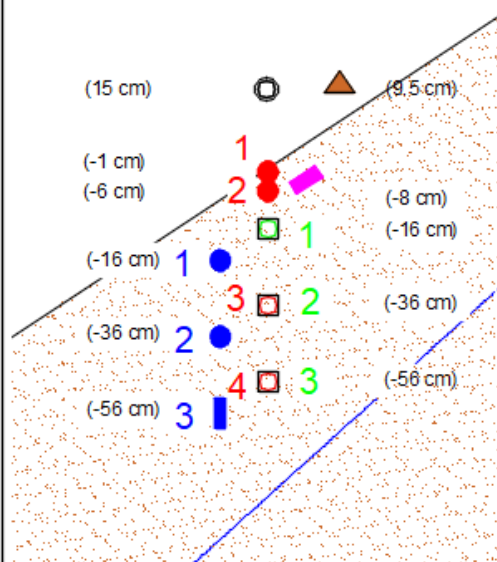
PRESIÓN DE LÍQUIDO



Anexo 5 Planos



Talud Norte

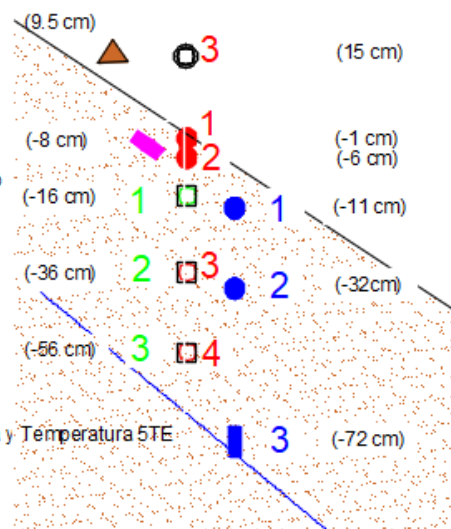


Corte B-B Área sin vegetación

Simbología

- Dirección y velocidad del viento Anemómetro
- Flujo de calor HFP
- Humedad relativa VP-4
- Succión MPS 6
- Presión de agua TP 4
- Temperatura T 107
- Contenido volumétrico de agua y Temperatura 5TE
- Membrana Impermeable

Talud Sur



TEMPERATURA

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	-1	SVN 107 (1)
2	-6	SVN 107 (2)
3	-36	SVN 5TE (2)
4	-56	SVN 5TE (3)

PRESIÓN DE AGUA

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	-16	SVN MPS6 (1)
2	-36	SVN MPS6 (2)
3	-56	TP 4

CONTENIDO VOLUMETRICO DE AGUA

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	-16	SVN 5TE (1)
2	-36	SVN 5TE (2)
3	-56	SVN 5TE (3)

FLUJO DE CALOR

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	-8	SVN HFP (1)

VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	15	SVN P (1)

HUMEDAD RELATIVA

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	9.5	SVN VP4 (1)

TEMPERATURA

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	-1	SVS 107 (4)
2	-6	SVS 107 (5)
3	-36	SVS 5TE (5)
4	-57	SVS 5TE (6)

PRESIÓN DE AGUA

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	-11	SVS MPS6 (3)
2	-32	SVS MPS6 (4)
3	-72	TP 4

CONTENIDO VOLUMETRICO DE AGUA

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	-16	SVS 5TE (4)
2	-36	SVS 5TE (5)
3	-57	SVS 5TE (6)

FLUJO DE CALOR

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	-8	SVS HFP (2)

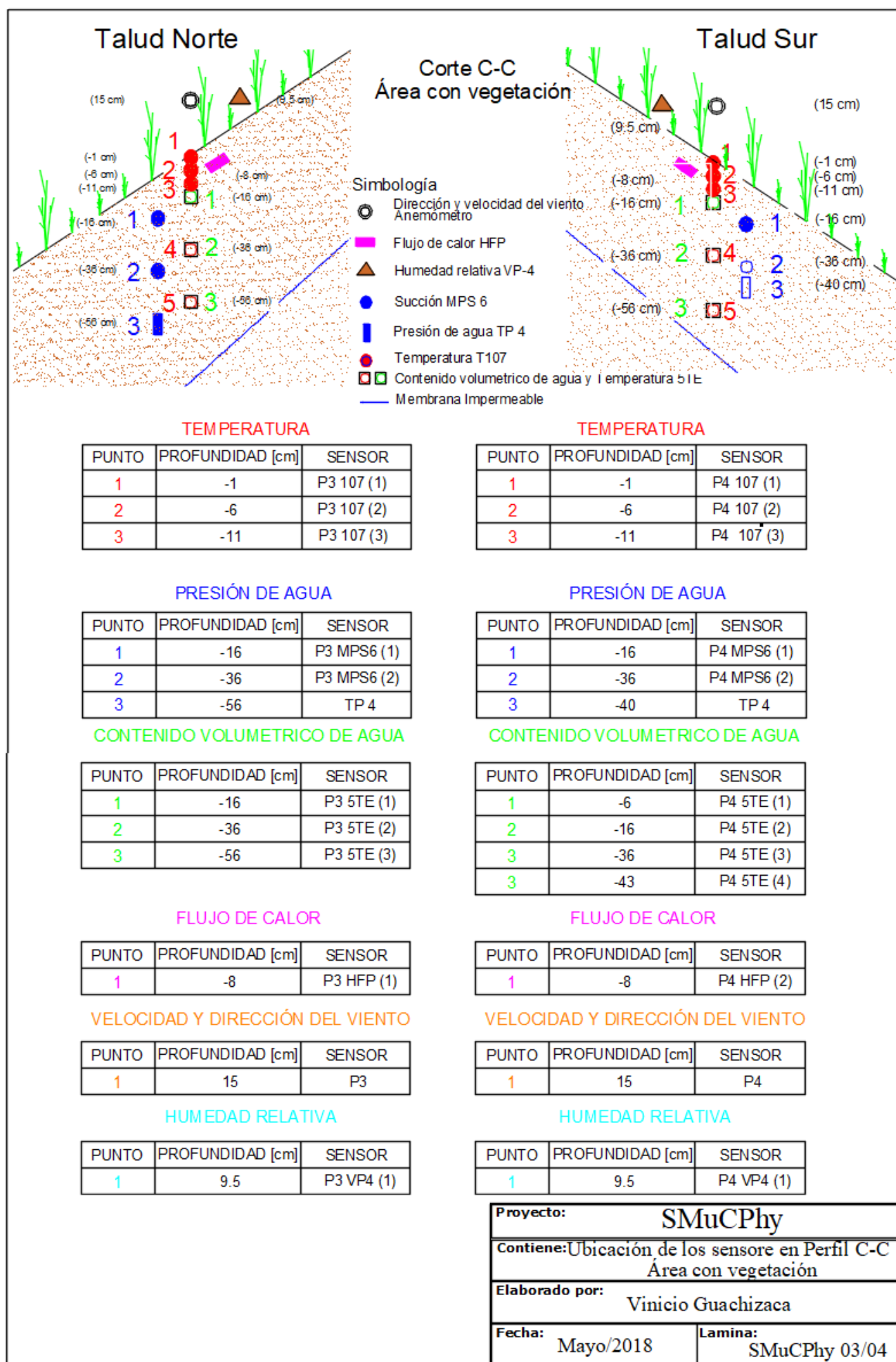
VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO

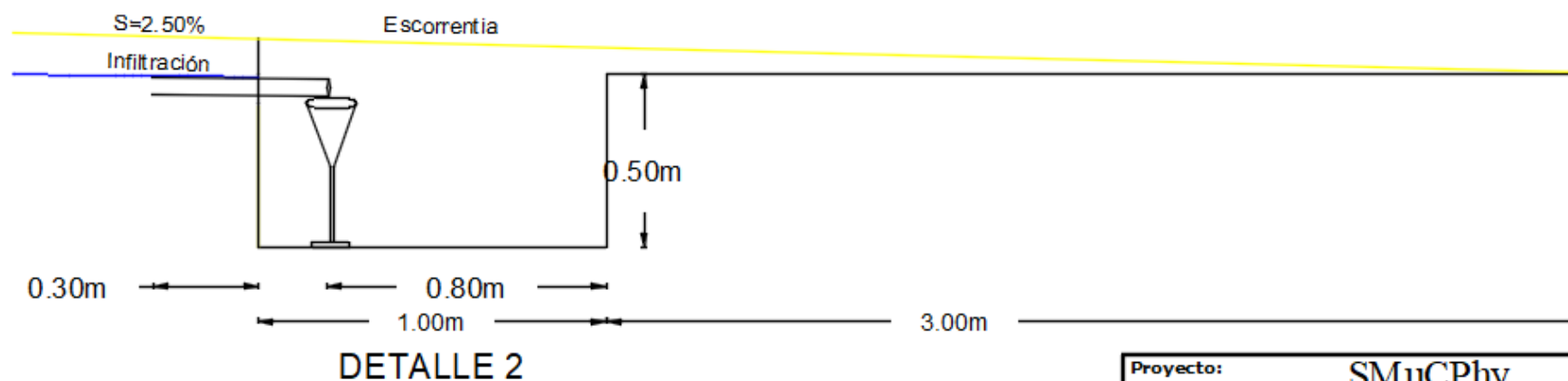
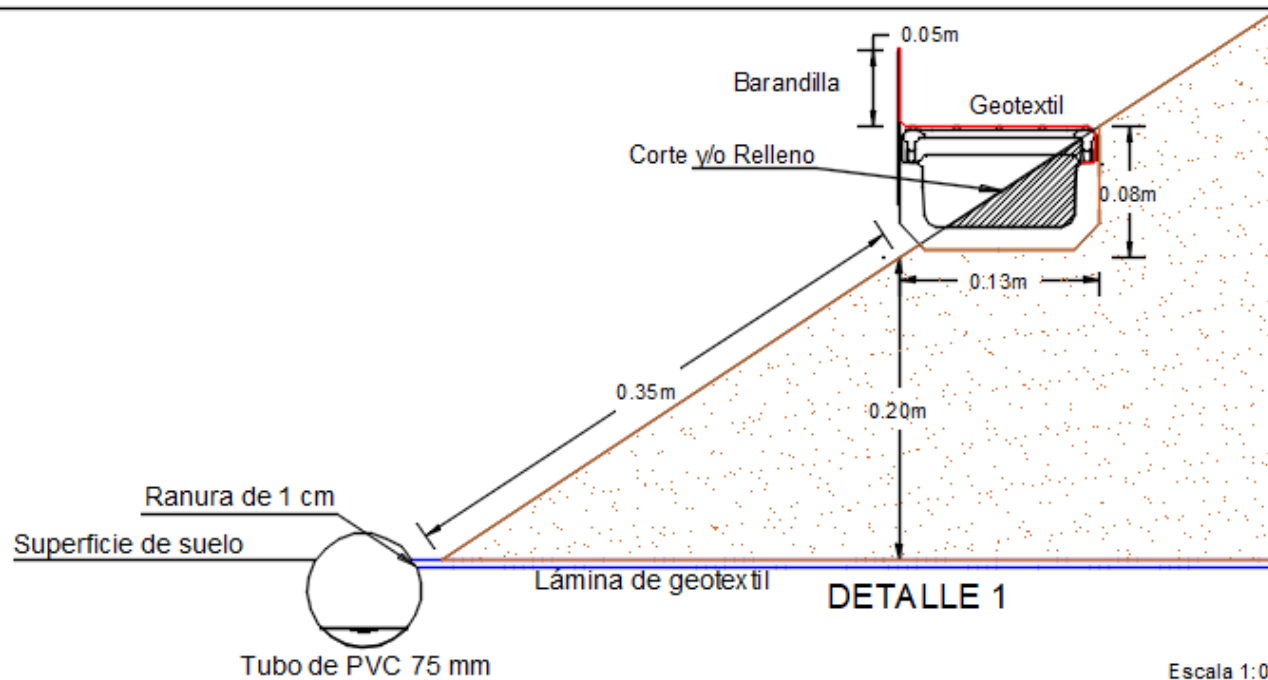
PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	15	SVS P (2)

HUMEDAD RELATIVA

PUNTO	PROFUNDIDAD [cm]	SENSOR
1	9.5	SVN VP4 (2)

Proyecto:	SMuCPHy
Contiene:	Ubicación de los sensores en Perfil B-B Área sin vegetación
Elaborado por:	Vinicio Guachizaca
Fecha:	Mayo/2018
Lamina:	SMuCPHy 02/04





Proyecto:	SMuCPHy
Contiene:	Detalles constructivos
Elaborado por:	Vinicio Guachizaca
Fecha:	Mayo/2018
Lamina:	SMuCPHy 04/04